セラミックスの水潤滑特性に及ぼす電気二重層の影響*

張 波^{*1}, 梅原徳次^{*2}Effect of Electric Double Layer on the Frictional Behavior
of Ceramics Lubricated with Water

Zhang BO and Noritsugu UMEHARA

We proposed theoretical equations to clarify the effect of an electric double layer on the frictional properties of ceramics lubricated with water. Apparant increase of viscosity due to the presence of the electric double layer was considered in these equations. We found that minimum water film thickness increased with the zeta potential of ceramic in water. Also, friction coefficient decreased with the increasing of the zeta potential of ceramic. As a result, it was found that a large zeta potential in water is a suitable property for ceramic bearing material in water.

Key Words: Lubrication, Ceramics, Bearing, Water, Electric DoubleLayer, Zeta Potential

1. 緒 言

セラミックスは、高硬度で、耐食性、耐熱性に優れているために、新しいトライボ材料として期待されている。特に、水中における低摩擦特性が発見されて以来⁽¹⁾、セラミックスの水中における摩擦特性はさらに注目されている。綱井・榎本⁽²⁾、堀田ら⁽³⁾および李・林ら⁽⁴⁾はピンオンディスク摩擦試験機を用いて、水中での摩擦係数に及ぼすセラミックス材料の影響およびトライボケミカル生成物の影響を実験的に調べた。また、翁・加藤ら⁽⁵⁾は摩擦係数が0.0004まで測定可能な円筒端面同士の摩擦装置によって水中のセラミックスのストライベック曲線を得た。しかし、このような水中におけるセラミックスの低摩擦係数を定量的に説明する機構はまだ明らかにされていない。

一方、窒化ケイ素同士の水中における繰返し滑り摩擦において、摩擦面の摩耗による平滑化とともに、流体潤滑状態が実現され、その流体潤滑膜厚さは約0.07 μm であることが報告されている⁽¹⁾。この流体潤滑膜厚さは固液界面に形成される境界膜の厚さと同じオー

ダである。すなわち、流体潤滑に与える境界膜の影響を考慮する必要があると考えられる。この境界膜の粘性は電気二重層により変化し得ることが報告されている⁽⁶⁾。そのため、セラミックスの水潤滑機構が流体潤滑状態とした場合、電気二重層による粘性の増加が摩擦係数を制御する場合重要となることが考えられる。

このような電気二重層の電気粘性に関するさまざまな研究結果が発表されている^{(6)~(12)}。Terzaghi⁽⁷⁾は狭いすきまにおける水の見掛け粘度が増加する現象を発見した。Macauley⁽⁸⁾は平行ガラス板の0.25 μm のすきまにおける水の粘度がバルクの値の十倍になることを報告した。Churaevら⁽⁹⁾は蒸発率の測定法により石英表面水膜の粘度が増加することを見出した。Derjaguin⁽¹⁰⁾、Hough⁽¹¹⁾もバルクより石英やガラス表面水膜の粘度が高いことを実験的に示した。また、Elton⁽⁶⁾は電気二重層の電気粘性について理論的に検討し、その理論と実験結果が一致することを示した。笹田ら⁽¹²⁾は0.3 μm までのすきまにおけるクロムめっきした鋼表面の水の粘度を測定し、その結果を電気二重層により説明した。また、Eltonによると、このような狭いすきまにおける水の見掛け粘度には電気二重層による表面ゼータ電位が大きな影響を及ぼすといわれている。

* 原稿受付 1996年8月21日。

*¹ 富山県立大学工学部(☎939-03 富山県射水群小杉町黒河)。*² 正員, 東北大学工学部(☎980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉)。

また、この電気二重層を考慮した流体潤滑理論は最近 Bike と Prieve により発表された⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。しかし、工学としてセラミックスの水潤滑軸受の設計指針となり得る負荷容量や摩擦力に関する理論式は得られていない。また、セラミックスの水潤滑特性に及ぼすゼータ電位などの電気二重層の影響を検討した研究はまだなされていない。

以上のような背景に基づき、本研究では、セラミックスの水潤滑における電気二重層の影響を考慮した流体潤滑理論を導出し、最小水膜厚さと摩擦係数に及ぼすゼータ電位の影響を明らかにする。また、実際のセラミックスのゼータ電位の測定値からセラミックスの水潤滑における電気二重層の影響を検討する。

2. 電気二重層を考慮した流体潤滑理論

2.1 電気二重層の構造 イオン性流体と固体が接触すると、その接触界面で電気二重層が生じる。その電気二重層の構造は図1のように考えられている⁽¹⁵⁾。すなわち、界面(その電位が ϕ_s)に接して特異吸着層(ステルン層)があり、その外側には通常の拡散層があるものとする。ここで、拡散層内の液体は壁から一分子ないし数分子層にわたっては、壁に対して相対運動は行わず、相対運動が始まるのはその外側に存在する平面からであると考え、この面を滑り面とよぶ。理論的には、この電位が決定的な役割を果たすので、この面上の電位を特にゼータ電位とよぶ⁽¹⁵⁾。

2.2 電気二重層を考慮した流体潤滑理論 図2のような潤滑モデルにおいて電気二重層を考慮した流体潤滑理論を検討する。下の表面を平面($z=0$)とし、Y軸方向と反対の方向に速度 U で移動し、上の表面は固定している。任意の (x, y) 点でのすきまを h とすると、そのすきまの中で、電気二重層の z 方向への電位分布は次式で示される⁽¹⁵⁾。

$$\phi = \begin{cases} \zeta \exp(-\kappa z) & 0 \leq z \leq h/2 \\ \zeta \exp(-\kappa(h-z)) & h/2 < z < h \end{cases} \quad \dots\dots (1)$$

ここで、 κ はボルツマン定数、 ζ はゼータ電位である。

Fig. 1 Diagram of the structure of electric double layer

そのすきま中の液体の微小要素に作用する力を考えると、通常の流体潤滑理論と違う点は、電気二重層を考慮した場合、その微小要素に働く力が粘性力と圧力のほかに、電気力もあることである。 x, y 方向の粘性力 dF_x, dF_y がそれぞれ次式で示される。

$$dF_x = -\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dx dy dz \quad \dots\dots (2)$$

$$dF_y = -\frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} dx dy dz \quad \dots\dots (3)$$

ニュートンの粘性則によって、次式を得る。

$$\tau_{zx} = -\eta \frac{\partial u_x}{\partial z} \quad \dots\dots (4)$$

$$\tau_{zy} = -\eta \frac{\partial u_y}{\partial z} \quad \dots\dots (5)$$

ここで、 u_x, u_y はそれぞれ液体速度の x, y 方向の分量、 η は液体の粘度である。式(2)~(5)より、以下の式が得られる。

$$dF_x = \eta \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} dx dy dz \quad \dots\dots (6)$$

$$dF_y = \eta \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} dx dy dz \quad \dots\dots (7)$$

圧力 dP_x, dP_y は次式である。

$$dP_x = -\frac{\partial p}{\partial x} dx dy dz \quad \dots\dots (8)$$

$$dP_y = -\frac{\partial p}{\partial y} dx dy dz \quad \dots\dots (9)$$

また、電気二重層中の電気力 dR_x, dR_y は次式で与えられる。

$$dR_x = E_x \rho dx dy dz \quad \dots\dots (10)$$

$$dR_y = E_y \rho dx dy dz \quad \dots\dots (11)$$

ここで、 E_x, E_y は電気二重層を有する壁面に対し、液体が平行に移動した際に発生する流動電位、 ρ は体積電荷密度である。毛細管や多孔栓中において流体が移動する場合、流体とともに電気二重層中の電荷が移動し、それより発生する流動電位と圧力との関係式としてヘルムホルツ-スモルコウスキー式がある。本研究においても、この式に基づき E_x, E_y は次式で示される

Fig. 2 Hydrodynamic lubrication model considering the electric double layer

と仮定する.

$$E_x = -\frac{\zeta\epsilon}{4\pi\eta_a\lambda} \frac{\partial p}{\partial x} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$E_y = -\frac{\zeta\epsilon}{4\pi\eta_a\lambda} \frac{\partial p}{\partial y} \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここで, η_a は見掛けの粘度, λ は導電率, p は液体の圧力である. ヘルムホルツ-スモコウスキー式は, 毛細管の径が電気二重層の厚さよりはるかに大きい場合に導かれたものであり, 粘度として電気二重層を考慮しない粘度 η を用いている. 本研究では, 電気二重層内の流れを考慮するため, 式(12), (13)では電気二重層を考慮した見掛けの粘度 η_a を用いる.

また, 微小要素における力の釣合い条件は次式で示される.

$$dF_x + dP_x + dR_x = 0 \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$dF_y + dP_y + dR_y = 0 \quad \dots\dots\dots (15)$$

式(14), (15)に式(6)~(11)を代入して次式が得られる.

$$\eta \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} - \frac{\partial p}{\partial x} + E_x \rho = 0 \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$\eta \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} - \frac{\partial p}{\partial y} + E_y \rho = 0 \quad \dots\dots\dots (17)$$

ところで, 電気二重層内の電位 ϕ は, 次式によって表される.

$$\nabla^2 \phi = -\frac{4\pi\rho}{\epsilon} \quad \dots\dots\dots (18)$$

ここで, ϵ は媒質の誘電率, ρ は体積電荷密度である. ここで, 式(16), (17)に式(18)を代入して, 次式が得られる.

$$\eta \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} - \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{E_x \epsilon}{4\pi} \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$\eta \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} - \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{E_y \epsilon}{4\pi} \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad \dots\dots\dots (20)$$

式(19)を2回積分すると, 次式が得られる.

$$\eta u_x - \frac{E_x \epsilon}{4\pi} \phi = \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x} z^2 + Az + B \quad \dots\dots\dots (21)$$

ここで, A, B は積分定数であり, 以下の境界条件より決定される.

$$\begin{cases} u_x = 0 \\ \phi = \zeta \end{cases} \quad z=0 \quad \text{または} \quad z=h \quad \dots\dots\dots (22)$$

これを式(21)に代入すると, A, B は次式で与えられる.

$$A = -\frac{h}{2} \frac{\partial p}{\partial x} \quad \dots\dots\dots (23)$$

$$B = -\frac{E_x \epsilon}{4\pi} \zeta \quad \dots\dots\dots (24)$$

結局, 式(21)は次のようになる.

$$\eta u_x = \frac{z^2}{2} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{hz}{2} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{E_x \epsilon}{4\pi} (\phi - \zeta) \quad \dots\dots\dots (25)$$

y 方向に対して, 同様に次式が得られる.

$$\begin{aligned} \eta u_y = & \frac{z^2}{2} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{hz}{2} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{E_y \epsilon}{4\pi} (\phi - \zeta) \\ & - \eta \left(1 - \frac{z}{h}\right) U \quad \dots\dots\dots (26) \end{aligned}$$

ここでは, 以下の境界条件を用いた.

$$\begin{cases} u_y = -U \\ \phi = \zeta \end{cases} \quad z=0 \quad \dots\dots\dots (27)$$

$$\begin{cases} u_y = 0 \\ \phi = \zeta \end{cases} \quad z=h$$

また, 単位時間 x 方向の流量は次式で表される.

$$Q_x = \int_0^h u_x dz$$

これに式(25), (1)を代入整理すると次式が得られる.

$$Q_x = \frac{1}{\eta} \left\{ -\frac{h^3}{12} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{E_x \epsilon \zeta}{4\pi} \left[h - \frac{2}{\kappa} (1 - e^{-\kappa h/2}) \right] \right\} \quad \dots\dots\dots (28)$$

また, 同様に y 方向に対しても次式が得られる.

$$\begin{aligned} Q_y = & \frac{1}{\eta} \left\{ -\frac{h^3}{12} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{E_y \epsilon \zeta}{4\pi} \left[h - \frac{2}{\kappa} (1 - e^{-\kappa h/2}) \right] \right\} \\ & - \frac{Uh}{2} \quad \dots\dots\dots (29) \end{aligned}$$

もし, 液体は非圧縮であると仮定すると, 質量保存則より次式が得られる.

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots (30)$$

これに式(28), (29)を代入すると, 次式が与えられる.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = & -\frac{U}{2} \frac{\partial h}{\partial y} \\ & - \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{E_x \epsilon \zeta}{4\pi\eta} \left[h - \frac{2}{\kappa} (1 - e^{-\kappa h/2}) \right] \right\} \\ & - \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{E_y \epsilon \zeta}{4\pi\eta} \left[h - \frac{2}{\kappa} (1 - e^{-\kappa h/2}) \right] \right\} \quad \dots\dots\dots (31) \end{aligned}$$

式(31)に式(12), (13)を代入して, 通常の流体潤滑理論のレイノルズ式と同じ形に書き直すと, 結局, 式(31)は次の形になる.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{12\eta_a} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h^3}{12\eta_a} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = -\frac{U}{2} \frac{\partial h}{\partial y} \quad \dots\dots\dots (32)$$

ここで, 見掛けの粘度 η_a は次式で表される.

$$\eta_a = \eta + \frac{3\epsilon^2 \zeta^2 \left\{ 3 - \frac{2}{\kappa} (1 - e^{-\kappa h/2}) \right\}}{4\pi^2 \lambda h^3} \quad \dots\dots\dots (33)$$

ここで, 式(32)を電気二重層を考慮したレイノルズ式の式とよぶことにする. このような電気二重層を考慮した見掛けの粘度 η_a を導入することは軸受材と潤滑剤の選択指針を与えるものと考えられる.

3. 電気二重層を考慮した 無限幅傾斜平面軸受理論

軸受の幅 B と長さ L の比 $B/L \gg 1$ の場合, x 方向の圧力変化を無視して近似的に無限幅軸受として取扱う。すなわち, 式(32)は次式となる。

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h^3}{12\eta_a} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = -\frac{U}{2} \frac{\partial h}{\partial y} \quad \dots\dots\dots (34)$$

それを積分すると, 次式が得られる。

$$\frac{h^3}{12\eta_a} \frac{\partial p}{\partial y} = -\frac{U}{2} (h - h_0) \quad \dots\dots\dots (35)$$

ここで, h_0 は積分定数である。式(35)に式(33)を代入すると, 式(35)が次式になる。

$$\frac{\partial p}{\partial y} = -\frac{6U(h-h_0)}{h^3} \times \left\{ \eta + \frac{3\varepsilon^2 \zeta^2 \left[h - \frac{2}{\kappa} (1 - e^{-\kappa h/2}) \right]}{4\pi^2 \lambda h^3} \right\} \quad \dots\dots\dots (36)$$

ここで, 計算の簡略化のため, $h \gg 1/\kappa$ と仮定する。すなわち, 潤滑膜厚さ h が電気二重層の厚さ $1/\kappa$ よりはるかに大きい。この場合, 以下の近似的な式を得る。

$$\frac{\partial p}{\partial y} = -\frac{6U(h-h_0)}{h^3} \left\{ \eta + \frac{3\varepsilon^2 \zeta^2}{4\pi^2 \lambda h^2} \right\} \quad \dots\dots\dots (36)'$$

積分すると, 圧力の分布が求められる。

$$p = \frac{6U\eta}{\alpha} \left\{ \frac{1}{h} - \frac{1}{H_0} - \frac{h_0}{2} \left(\frac{1}{h^2} - \frac{1}{H_0^2} \right) + \frac{3\varepsilon^2 \zeta^2}{4\pi^2 \lambda \eta} \left[\frac{1}{3h^3} - \frac{1}{3H_0^3} - \frac{h_0}{4} \left(\frac{1}{h^4} - \frac{1}{H_0^4} \right) \right] \right\} \quad \dots\dots\dots (37)$$

ここで, H_1 と H_0 は傾斜平板の入口部と出口部におけるそれぞれの高さ, α は次式で表される傾斜平板の傾きを示す。

$$\alpha = \frac{H_1 - H_0}{L}$$

境界条件は

$$p=0, \quad h=H_0 \quad \text{または} \quad h=H_1$$

である。式(37)において境界条件を用いて積分定数 h_0 を求める。

$$h_0 = \frac{\eta \left(\frac{1}{H_1} - \frac{1}{H_0} \right) + \frac{\varepsilon^2 \zeta^2}{8\pi^2 \lambda} \left(\frac{1}{H_1^3} - \frac{1}{H_0^3} \right)}{\frac{\eta}{2} \left(\frac{1}{H_1^2} - \frac{1}{H_0^2} \right) + \frac{3\varepsilon^2 \zeta^2}{32\pi^2 \lambda} \left(\frac{1}{H_1^4} - \frac{1}{H_0^4} \right)} \quad \dots\dots\dots (38)$$

式(37)は無限幅傾斜軸受の圧力分布を表している。また, 式(37)を無次元の圧力 p^* で書き直すと, 次式を得る。

$$p^* = H_0 \left\{ \frac{1}{h} - \frac{1}{H_0} - \frac{h_0}{2} \left(\frac{1}{h^2} - \frac{1}{H_0^2} \right) + \frac{3\varepsilon^2 \zeta^2}{4\pi^2 \lambda \eta} \left[\frac{1}{3h^3} - \frac{1}{3H_0^3} - \frac{h_0}{4} \left(\frac{1}{h^4} - \frac{1}{H_0^4} \right) \right] \right\} \quad \dots\dots\dots (37)'$$

ここで, p^* は次式で定義される。

$$p^* = p \left(\frac{\alpha H_0}{6\eta U} \right)$$

3・1 無限幅傾斜軸受の荷重

式(37)を積分することにより, その軸受の単位長さ当たりの荷重 W を求める。

$$W = \int_0^L p dy = \frac{1}{\alpha} \int_{H_0}^{H_1} p dh = \frac{6U\eta}{\alpha} \int_{H_0}^{H_1} \left\{ \frac{1}{h} - \frac{1}{H_0} - \frac{h_0}{2} \left(\frac{1}{h^2} - \frac{1}{H_0^2} \right) + \frac{3\varepsilon^2 \zeta^2}{4\pi^2 \lambda \eta} \left[\frac{1}{3h^3} - \frac{1}{3H_0^3} - \frac{h_0}{4} \left(\frac{1}{h^4} - \frac{1}{H_0^4} \right) \right] \right\} dh$$

すなわち, W は以下の式となる。

$$W = \frac{6U\eta}{\alpha^2} \left\{ \ln \frac{H_1}{H_0} - \frac{H_1 - H_0}{H_0} - \frac{h_0}{2} \left(\frac{1}{H_0} - \frac{1}{H_1} - \frac{H_1 - H_0}{H_0^2} \right) + \frac{3\varepsilon^2 \zeta^2}{4\pi^2 \lambda \eta} \left[\frac{1}{6} \left(\frac{1}{H_0^2} - \frac{1}{H_1^2} \right) - \frac{H_1 - H_0}{3H_0^3} - \frac{h_0}{4} \left(\frac{1}{3H_0^3} - \frac{1}{3H_1^3} - \frac{H_1 - H_0}{H_0^4} \right) \right] \right\} \quad \dots\dots\dots (39)$$

無次元の荷重 W^* は次式で与えられる。

$$W^* = \ln \frac{H_1}{H_0} - \frac{H_1 - H_0}{H_0} - \frac{h_0}{2} \left(\frac{1}{H_0} - \frac{1}{H_1} - \frac{H_1 - H_0}{H_0^2} \right) + \frac{3\varepsilon^2 \zeta^2}{4\pi^2 \lambda \eta} \left[\frac{1}{6} \left(\frac{1}{H_0^2} - \frac{1}{H_1^2} \right) - \frac{H_1 - H_0}{3H_0^3} - \frac{h_0}{4} \left(\frac{1}{3H_0^3} - \frac{1}{3H_1^3} - \frac{H_1 - H_0}{H_0^4} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (39)'$$

ここで, W^* は次式で定義される。

$$W^* = W \frac{\alpha^2}{6\eta U}$$

一方, 電気二重層を考慮しない場合, 無次元荷重 W^* は次式で与えられる。

$$W^* = \ln \frac{H_1}{H_0} - \frac{H_1 - H_0}{H_0} - \frac{h_0}{2} \left(\frac{1}{H_0} - \frac{1}{H_1} - \frac{H_1 - H_0}{H_0^2} \right) \quad \dots\dots\dots (40)$$

ここで,

$$h_0 = \frac{\eta \left(\frac{1}{H_1} - \frac{1}{H_0} \right)}{\frac{\eta}{2} \left(\frac{1}{H_1^2} - \frac{1}{H_0^2} \right)} \quad \dots\dots\dots (41)$$

Fig. 3 The effect of ζ -electron potential on the minimum film thickness for different load

3・2 無限幅傾斜軸受の摩擦係数 式(26)に式

(13)を代入すると、次式を得る。

$$\eta u_y = \left\{ \frac{z^2}{2} - \frac{hz}{2} - \frac{\varepsilon^2 \zeta (\psi - \zeta)}{16\pi^2 \lambda \eta a} \right\} \frac{\partial p}{\partial y} - \eta \left(1 - \frac{z}{h} \right) U \quad \dots\dots\dots (42)$$

ニュートン粘性則より、 τ_{zy} は以下の式で表される。

$$\tau_{zy} = -\eta \frac{\partial u_y}{\partial z} = \left(z - \frac{h}{2} \right) \frac{\partial p}{\partial y} + \eta \frac{U}{h}$$

それに下の表面で $z=0$ を代入すると

$$\tau_{zy} = -\frac{h}{2} \frac{\partial p}{\partial y} + \eta \frac{U}{h} \quad \dots\dots\dots (43)$$

となる。この式の η において、電気二重層による粘度の増加は含まれていない。

したがって、式(43)より単位軸受幅当たりの摩擦力 F は次式で与えられる。

$$F = \int_0^L \tau_{zy} dy = \int_0^L \left(-\frac{h}{2} \frac{\partial p}{\partial y} + \eta \frac{U}{h} \right) dy \\ = \frac{\alpha}{2} W + \frac{\eta U}{\alpha} \ln \frac{H_1}{H_0} \quad \dots\dots\dots (44)$$

ゆえに、摩擦係数は、

$$\mu = \frac{F}{W} = \frac{1}{W} \left\{ \frac{\alpha}{2} W + \frac{\eta U}{\alpha} \ln \frac{H_1}{H_0} \right\} \quad \dots\dots\dots (45)$$

となる。無次元荷重 W^* で書き直すと、次式を得る。

$$\mu = \frac{\alpha}{2} + \frac{\alpha}{6 W^*} \ln \frac{H_1}{H_0} \quad \dots\dots\dots (45)'$$

4. 理論計算結果

計算によって得られたセラミックスの水潤滑における最小水膜厚さと摩擦係数に及ぼすゼータ電位の影響をそれぞれ図3,4に示す。また、計算で用いた摩擦条件を表1に示す。この摩擦条件は、翁ら⁽⁵⁾の実験条件を基にして決定した。摩擦面のうねりを考慮し、軸受長さが0.1mmで軸受面の傾斜が0.003である無限幅軸受が円周方向に並んでいると仮定した。また、ゼータ電位の値の範囲については、石橋ら⁽¹⁶⁾の測定したセラミックスの Al_2O_3 、 Si_3N_4 および SiC において

Fig. 4 The effect of ζ -electron potential on the friction coefficient for different load

Table 1 Calculating conditions

Parameters	Value
Viscosity of water η (Pa·s)	0.001
Dielectric constant of water ε	80
Conductivity of water λ ($\mu\text{S/m}$)	190
Slope of bearing surface α	0.003
Length of bearing L (mm)	0.1
Zeta electric potential ζ (mV)	0~150

の値(それぞれ、 -30 mV、 -40 mV および -70 mV)により決めた。また、表2に各セラミックスのゼータ電位が石橋らの測定した値である場合の最小水膜厚さおよび摩擦係数を示す。図3より、セラミックスの材料が変わり、ゼータ電位が増加することより、水の見掛け粘度が増加するため、最小水膜厚さ H_0 が増加することがわかる。一方、図4より、ゼータ電位の増加にともない低荷重の場合では摩擦係数は減少するが、高荷重の場合では、摩擦係数はほとんど変化しないことがわかる。式(45)'により、摩擦係数は軸受面の傾斜により形成する部分と粘性せん断による部分との二つの部分から成る。高荷重の場合、摩擦係数は軸受面の傾斜が主因となって、粘性せん断の部分がほとんど無視できるから、摩擦係数はゼータ電位によらずほぼ一定になると考えられる。最後に、これらの結果をまとめた表2より、ゼータ電位の大きいセラミックスである SiC が、 Al_2O_3 に比べて同じ負荷に対して水膜厚さも大きく、かつ摩擦係数も小さいことを期待できることがわかる。ゼータ電位が大きいほど、水膜厚さが大きい結果より、ゼータ電位が大きいほど、小さな軸受定数でも流体潤滑を保つことができ、ストライベック線図における最小摩擦係数を得る軸受定数が小さいことが考えられる。翁ら⁽⁵⁾のセラミックスの水潤滑におけるストライベック線図から得られた実験結果において、最小摩擦係数が得られる軸受定数は、低滑り速度の500 rpmで Al_2O_3 、 Si_3N_4 、 SiC の順序で減少

Table 2 Minimum film thickness and friction coefficient for different ceramics for $W^*=0.5$

	Minimum film thickness H_o , μm	Friction coefficient μ
Al_2O_3	0.078	0.00310
Si_3N_4	0.090	0.00294
SiC	0.121	0.00275

し、この順序はゼータ電位の順序に伴う最小水膜厚さの順序に一致する結果である。以上より、実際のセラミックスの水潤滑特性に電気二重層が大きな影響を与えることが予測できる。

5. 結 言

セラミックスの水潤滑の潤滑特性に及ぼす電気二重層の影響を理論的に明らかにした。特に、最小水膜厚さと摩擦係数に及ぼすゼータ電位の影響を明らかにした。得られたおもな結果を以下に示す。

(1) セラミックスの水潤滑において電気二重層による見掛けの粘度の増加を考慮したレイノルズ式を導出した。

(2) この式により、セラミックスの水中でのゼータ電位の範囲において計算した結果、最小水膜厚さはゼータ電位の増加とともに増加することを明らかにした。また、摩擦係数はゼータ電位が増加するとともに減少することを明らかにした。

(3) 本理論的研究から得られたセラミックスの水潤滑におけるゼータ電位と潤滑特性の関係が、実験結

果と同じ傾向にあることが確認された。

終わりに、本研究に有益なご助言を頂いた東北大学工学部の加藤康司教授および八田有教授、ならびに東北大学素材研究所の佐々木弘教授に厚くお礼を申し上げます。また、著者の一人の張は、包玉剛奨学金の名誉と、この研究を行うための支援をして下さった浙江大学に感謝申し上げます。

文 献

- (1) Tomizawa, H. and Fisher, T. E., *ASLE Trans.*, **31**-1 (1987), 41-46.
- (2) 網井裕子・榎本祐嗣, 日本潤滑学会第33期春季研究発表会予稿集, (1988), 29-32.
- (3) 堀田滋・水谷嘉之, 日本潤滑学会第33期春季研究発表会予稿集, (1988), 1-4.
- (4) 李同生・ほか2名, 日本潤滑学会トライボロジー会議予稿集(東京), (1991), 605-607.
- (5) 翁和榮・ほか3名, 機論, **61**-590, C (1995), 4027-4031.
- (6) Elton, G. A. H., *Proc. Roy. Soc.*, A194 (1948), 259-270.
- (7) Terzaghi, J., *Rheology*, **2** (1931), 253-265.
- (8) Macauley, *Nature*, **138** (1936), 587-593.
- (9) Churaev, N. N. V., ほか3名 *J. Colloid and Interface Sci.*, **48** (1974), 374-383.
- (10) Derjaguin, B. V., *Chem. Sci.*, **9** (1976) 97-105.
- (11) Hough, D. B. and Ottewill, R. H., *Progr. Colloid Polym. Sci.*, **68** (1983), 101-112.
- (12) 笹田直・上条謙二郎, 潤滑, **14**-6 (1969), 296-302.
- (13) Prieve, D. C. and Bike, S. G., *Chem. Eng. Comm.*, **155** (1987), 149-160.
- (14) Bike, S. G. and Prieve, D. C., *J. Colloid and Interface Sci.*, **136**-1 (1990), 95-112.
- (15) Shaw, D. J., 北原文雄・青木 共訳, コロイドと界面の化学, (1973), 126-136, 廣川書店.
- (16) 石橋勝・ほか3名, 第45回コロイド及び界面化学討論会講演要旨, (1992), 546-547.