

Double Network Gel の超低摩擦時における侵入液体挙動の摩擦面 in-situ 観察

In-situ observation of friction surface of invading liquid behavior of
Double Network Gel at ultra-low friction

東北大・工（院）*多田 梢哉太 東北大・工（正）足立 幸志 東北大・工（正）村島 基之

Teita Tada, Koshi Adachi, Motoyuki Murashima

Tohoku University

1. 緒言

Double Network Gel (DN ゲル) は、その高含水性と高強度によりしゅう動部材として有望であり、生体材料などのバイオインターフェイスへの応用が期待されている。従来は水の DN ゲルを水中摩擦させる研究が主であったが、水以外の物質を含有した DN ゲル含有の摩擦特性への影響の解明が望まれる。先行研究では、DN ゲルの内部液体および外部液体の違いが摩耗形態や摩擦挙動に影響を及ぼしていることが明らかになっている。しかし、内部液体が摩耗形態や摩擦挙動に影響を及ぼすメカニズムは未だ不明である。

そこで本研究では、in-situ 摩擦試験により、摩擦中の DN ゲルの変化や摩擦界面における潤滑状態を観察し、外部液体の侵入の過程を追跡する。これにより、本研究では、DN ゲルの摩擦システムにおける内部液体および外部液体の役割を明らかにすることを目的とする。

2. 実験方法

本研究では、ball-on-disk 摩擦試験機を用いた。試験機の概略図を Fig. 1 に示す。ボール試験片には、直径 10 mm、厚さ 3 mm の円板形状に切り出した DN ゲルを、直径 8 mm の炭化ケイ素ボールを覆うように取り付けた。DN ゲルの内部液体を、赤インクを 10 vol% 溶かした 2 種の液体（精製水と 10^5 倍に希釈した乳酸）に置換した。ディスク試験片は、DN ゲルの摩擦面の観察のため、透明なガラスとした。荷重は 2~10 N、すべり速度は 10~100 mm/s、すべり距離は 30 m とした。外部液体は、青インクを 10 vol% 溶かした精製水とした。

3. 実験結果および考察

3.1 外部液体の DN ゲル内部への染み込み

Figure 2 は、DN ゲルの内部液体が精製水および乳酸のときの、滑り距離 20 mm から 100 mm までにおけるその場観察画像を示している。生画像は彩度の低い画像であるが、ここでは視認性を上げるために、橙色が強くなるような画像補正を行った。また、この二つの条件ではどちらも摩擦係数 0.02 以下となっている。乳酸を用いた実験では、摩擦開始後からしゅう動部前縁より徐々に濃い橙色の領域が後端に移動していく様子が確認された。これは摩擦試験開始直後にのみ見られる現象であるため、外部液体の流れを表していると推察される。一方で内部液体が精製水のときには、滑り距離が 80 mm の時に濃い橙色の部分が現れ、そしてすべり距離が 100 mm の時点でもまだ右端まで達しないことが観察された。このように、内部液体の種類により摩擦界面における外部液体の挙動が大きく変わることが明らかとなった。摩擦試験後の DN ゲルの表面形状を Fig. 3 に示す。内部液体が精製水の場合には (Fig. 3a)，摩擦面に微小な凹

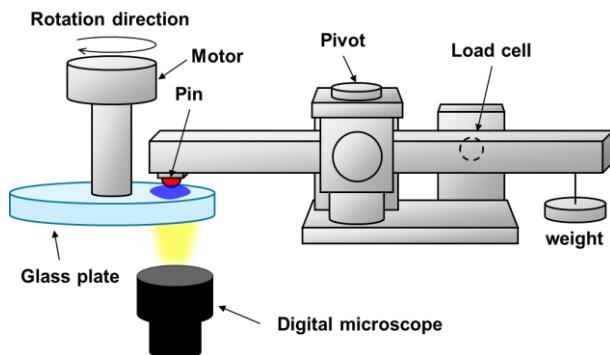


Fig. 1 Schematic of in-situ friction tester.

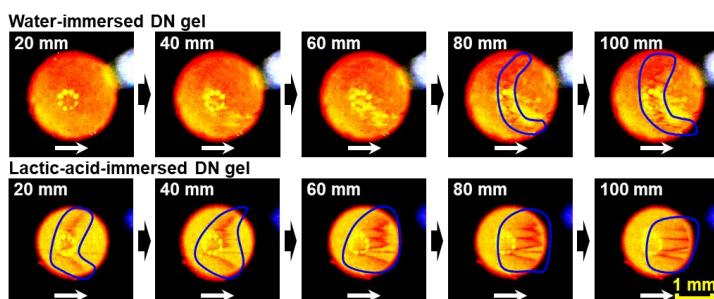


Fig. 2 Water-immersed (above) and lactic-acid-immersed (below) DN gel sliding surfaces at the sliding distance of 20, 40, 60, 80, 100 mm in water lubricated condition. Arrows indicate the sliding direction of the disk. The images were edited to make the liquid ingress region easier to distinguish.

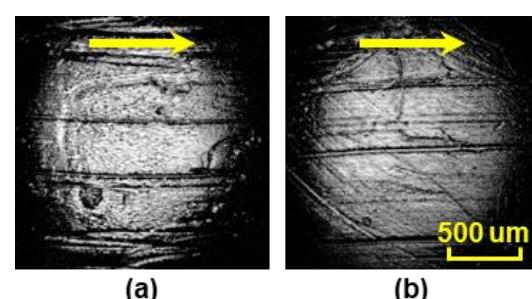


Fig. 3 Confocal microscope images of DN gel immersed with (a) water (b) lactic acid. The condition is 10 N, 100 mm/s. Arrows indicate the sliding direction of counter surface.

凸が形成されている様子が確認できる。一方で内部液体が乳酸の場合は (Fig. 3b), 数本のスクラッチ痕があることを除けば、初期表面と同じような平滑な面が観察された。先行研究では、内部液体が精製水で低摩擦を発現するときには、表面に損傷層が形成され、内部に外部液体が染み込むことが示されている。このことを考えると、内部液体が精製水のときに外部液体の移動速度が遅いという本研究で得られた観察結果は、外部液体が DN ゲル内部に染み込みながら移動したためであると考えられる。一方で乳酸のときには、表面が損傷せず外部液体の染み込みも少ないため、流体潤滑状態となり移動速度が速かったと考えられる。

3.2 DN ゲルの摩擦面の色の変化と摩擦係数に関する考察

次に本研究では、その場観察における色の RGB の変化を分析した。撮影画像のある 1 点における試験中の色の変化を Fig. 4 に示す。Fig. 4 (b) は、Fig. 4 (a) で示した摩擦面の 1 点における画素を動画フレームごとに取り出し、それを左上から右方向に 1 ピクセルごとに並べたものである。1 サイクル並べたところで右端とし、次のサイクルは直下の左端から並べた。この図より、すべり距離の増加とともに摩擦面が黄色から緑色に変わっていくことがわかる。

次に、負荷荷重及びすべり速度の条件ごとの、試験開始時点に対する、終了時点の G の画素値の割合を Fig. 5 に示す。内部液体が水のとき、高荷重かつ低速度ほど色は変わらず、低荷重かつ高速度ほど、色の変化が大きかった。高荷重、低速度の領域において変色しなかった結果は、表面損傷層が形成されず高摩擦を発現するという先行研究の結果と整合している。また、乳酸を含浸させた時は、負荷荷重に関わらず低すべり速度の領域では変色しなかった。DN ゲル摩擦面の変色は損傷層への外部液体の染み込みにより生じるという先行研究の結果から考えると、乳酸含有 DN ゲルの低すべり速度条件下では内部液体が染み込まないということを示唆している。

Fig. 6 に、 V/P の値に対する摩擦係数と、変色の有無の関係を示す。ここで V はすべり速度、 P は荷重である。 V/P が 10 未満のとき、ほとんどの試験で変色せず、摩擦係数が 0.01 を上回った (Mode I)。 V/P が 10 以上の場合には、変色した試験は 0.005 以上の摩擦係数を示した (Mode II)。その一方で $V/P=20$ の時には、純水および乳酸含有条件のどちらでも 0.01 以下の摩擦係数を示した (Mode III)。Mode III における純水含有条件は G の変化が唯一プラス側への変化であった (Fig. 5)。この試験片の共焦点画像を確認したところ DN ゲル表面には損傷が観察された。そのため、表面損傷により液体の良好な授受がなされ、0.01 以下の超低摩擦が発現したと考えられる。乳酸条件においてはわずかな表面損傷しか観察されなかった。一方で色の変化は、純水条件とは異なりマイナス側に 0.15 以上変化する。これは、青く染色された外部液体が多く存在するためと考えられ、厚い流体潤滑膜が形成されていると考えられる。加えて摩擦係数 0.0001 以下を示した試験片では、表面が初期状態と同じ滑らかさを保っていた。結果として、乳酸を含有させることによる超低摩耗が低摩擦を実現することが可能であることが示された。

4. 結言

1. DN ゲル内の水分を乳酸水溶液に置換したとき、外部液体の侵入速度が速くなる現象が観察された。
2. 乳酸を含有させた DN ゲルにおいて超低摩擦 0.0001 以下を示す条件が確認された。加えてその時の DN ゲル表面は、共焦点顕微鏡観察により、摩擦前の DN ゲルと同じ滑らかさを保っていることが観察された。

文献

- 1) R. Zhang, F. Ning, X. Hu, J. Zhen, B. Ge, Z. Jia, Bionic layered hydrogel with high strength for excellent lubrication and load capacity, Journal of Applied Polymer Science, 141, 33 (2024).
- 2) Koki Kanda, Koshi Adachi, Running-in of a Double Network Gel for Low Friction in Water, 16, 3 (2021) 170-177.

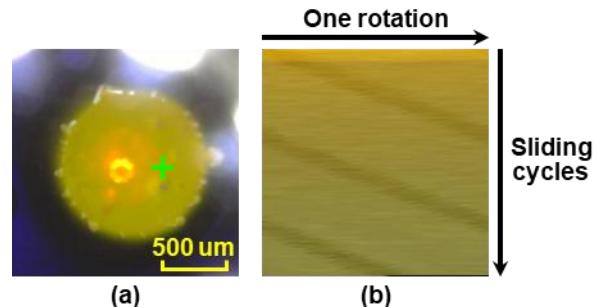


Fig. 4 (a) Whole friction interface and (b) transition of the color at the point of DN gel immersed with lactic acid at the condition with 5 N and 50 mm/s. The green cross mark in (a) indicates the color detected point.

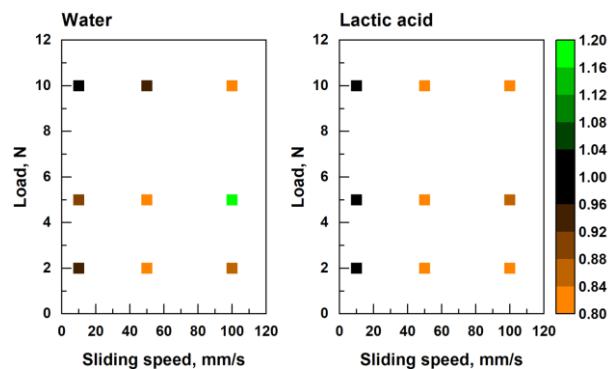


Fig. 5 Color changes of DN gel sliding interfaces.

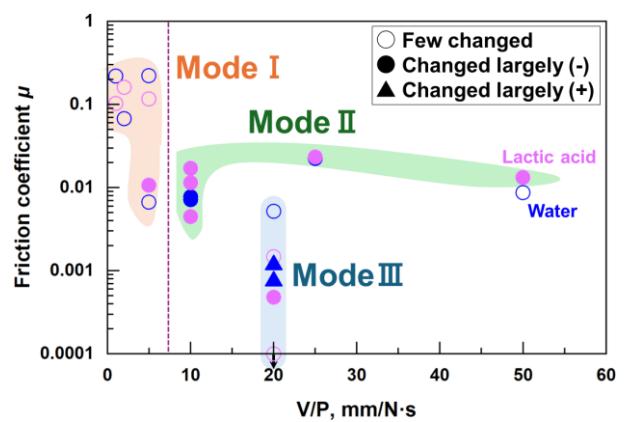


Fig. 6 Relation between V/P parameter and friction coefficient.