

## 炭素系ナノ粒子による低摩擦メカニズム

### Low friction mechanism by carbon-based nanoparticles

宇大・工（正）馬渕 豊

Yutaka Mabuchi

Utsunomiya University

#### 1. はじめに

普及の進む水素フリーDLC膜の低摩擦機構はIsabelら<sup>1)</sup>の解析により明らかになっている。摺動によりsp<sup>3</sup>結合からsp<sup>2</sup>結合に変態した表層（グラフェン）において、添加剤由来の-OH基が炭素原子に終端するモデルで、その先に水や-OH基を持つ添加剤の水素結合により低せん断層を形成する。著者らはこのモデルを基に、ナノダイヤモンドや酸化グラフェン、フラーレン等の炭素系ナノ粒子表面に形成された官能基-OHがキーと考え、これに極性を持つ溶媒が水素結合することによる低せん断層の形成が低摩擦化をもたらす主要因と考えている（Fig.1）<sup>2)</sup>。本報ではこれまでの研究成果を基に、炭素系ナノ粒子による低摩擦メカニズムに関する検討結果を紹介する。

#### 2. 低摩擦メカニズム

##### 2-1 ナノ粒子の直接観察による官能基の解析

ナノ粒子による低摩擦化の解析の多くは試験後の摺動部（ディスク）の観察を中心に行っている例が多いが、著者らの解析では、非摺動部との差が無くても摩擦が低い場合も多く、粒子自体を直接観察することが重要と考えている。Fig.1は試験後のナノ粒子を遠心分離により回収し、粒子自体の試験前後の変化を解析した例である。ここではナノダイヤモンド粒子0.1wt%を重水（D<sub>2</sub>O）に分散し、摩擦試験後TOF-SIMS分析にて結合状態を調べた結果、C-OHに対しC-ODがある一定の比率で抽出された。製造段階で生成した官能基が摺動により脱離し、溶媒由来の官能基C-ODに置換されたと考えられ、低摩擦の持続性に官能基供給源となる溶媒の必要性を示唆している<sup>3,4)</sup>。

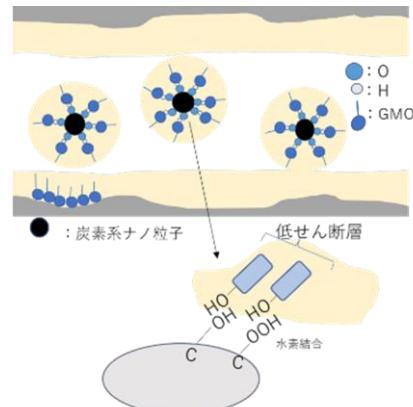


Fig.1 炭素系ナノ粒子による低摩擦化モデル

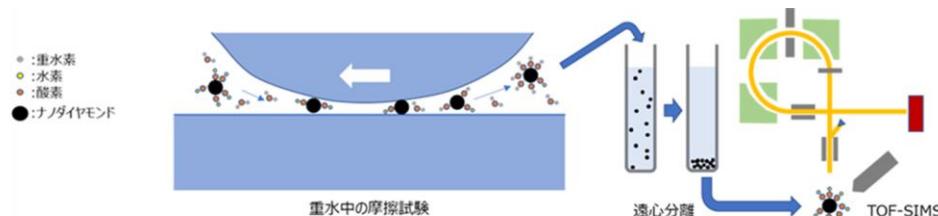


Fig.2 炭素系ナノ粒子分散溶媒からのナノ粒子の抽出とナノ粒子のTOF-SIMS分析

##### 2-2 低摩擦を発揮する摺動条件

炭素系ナノ粒子による低摩擦化を発揮する条件として、なじみにより2面間の間隔が制御された状態が望ましい。Fig.2は酸化グラフェン（GO）を含む潤滑下でDisk側の表面性状を変更することで潤滑状態λを変えた試験結果で、潤滑状態が境界から混合潤滑側で大きな効果を発揮している<sup>5)</sup>。線接触のPin/Diskより面接触のRing/Diskの方が、また試験面圧を変えた試験では低面圧側で効果が大きかった<sup>6)</sup>。なじみを促進する別な手法としてDisk材の硬度を下げるごとや、添加剤ZnDTPによる鋼材の腐食摩耗も有効である<sup>6,7)</sup>。なおZnDTPによるDisk表面には150nmの被膜が形成されるが、摩擦係数はむしろ低い値を示し、GOによる被膜形成が主要メカニズムでないことを示唆している。

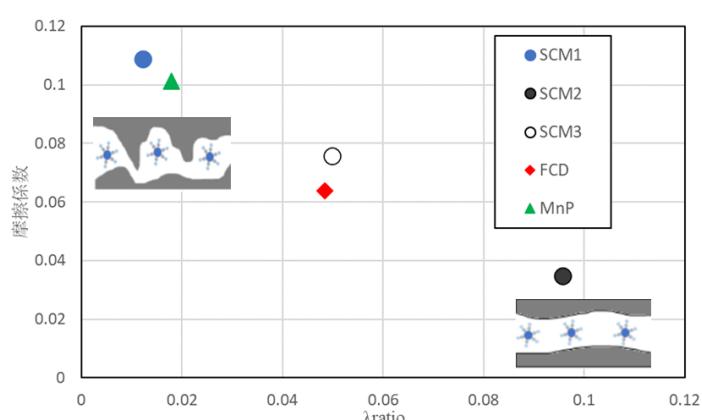


Fig.3 異なるλレシオでのGOの摩擦係数

## 2-2 ナノ粒子の分散状態の影響

溶媒中のナノ粒子の分散状態の影響を示す例として、ここでは GO 分散水の試験結果を紹介する。GO 分散水の pH は 2~3 と低く、これは製造工程で生じる GO の官能基であるカルボン酸 (-COOH) が原因と考えられる。GO を潤滑油に分散した場合、酸化防止剤の消耗が懸念されるため pH 影響を添加量の影響と共に調査した。動的光散乱法にて摩擦試験前後の GO 粒子の 2 次粒子径を計測した結果、pH3 では試験後に粒径が増大し、pH7,10 では粒径があまり変わらない、もしくは減少に転じた。分散水中の GO の 2 次粒子径と添加量から GO 粒子の総表面積を算出し(Fig.4)。摩擦係数との比較をおこなった(Fig.5)。その結果、総表面積が一定以下(約 150cm<sup>2</sup>)では摩擦係数は総表面積に強く影響をうけ、それ以上では比較的摩擦係数の安定した様子が認められた。以上の結果から、低摩擦化のためには溶媒中である一定以下の 2 次粒子径を維持する必要があると考えられる。

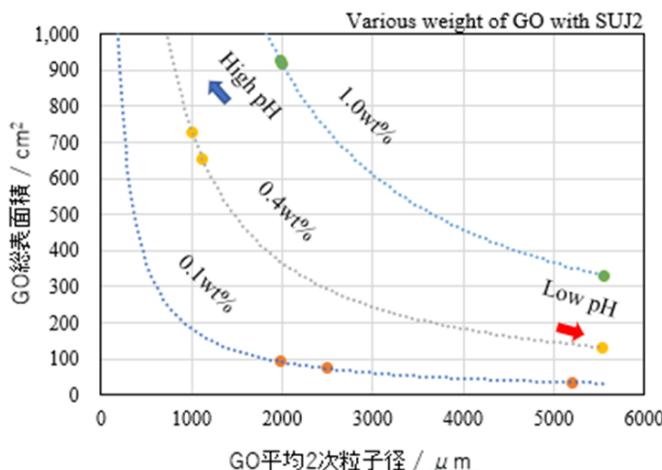


Fig.4 GOの2次粒子径と総表面積の関係

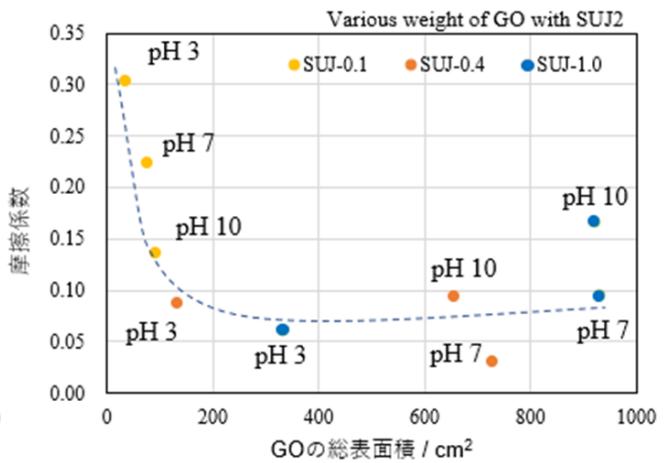


Fig.5 摩擦係数とGO総表面積の関係

## 3. まとめ

炭素系ナノ粒子による低摩擦メカニズムに関する解析事例を紹介した。主なポイントは下記となる。

- [1] 低摩擦の持続性のために、ナノ粒子に官能基を供給する溶媒が必要である。
- [2] ナノ粒子による低摩擦の実現にはなじみにより2面間の間隔が制御された状態が望ましい。
- [3] 低摩擦化のためには溶媒中で一定以下の2次粒子径を維持する必要がある。

## 4. 参考文献

- 1) Maria Isabel De Barros Bouchet, et al., Scientific Reports (12 April 2017) p1-13.
- 2) 岩下ら, 日本機械学会 2022 茨城講演会, 予稿集, No.416.
- 3) 馬渕ら, トライボロジー会議 2020 秋, C19, p-172.173.
- 4) レンツら, トライボロジー会議 2021 春, E5, p278-279.
- 5) 寺内ら, 表面技術協会 第 146 回講演大会, 予稿集, NO.07C-08.
- 6) 田崎ら, トライボロジー会議 2020 秋, C20, p174-175.
- 7) 寺内ら, 日本機械学会 2021 茨城講演会, 予稿集, No.402.
- 8) レンツら, トライボロジー会議 2022 春, F15, p324-325.