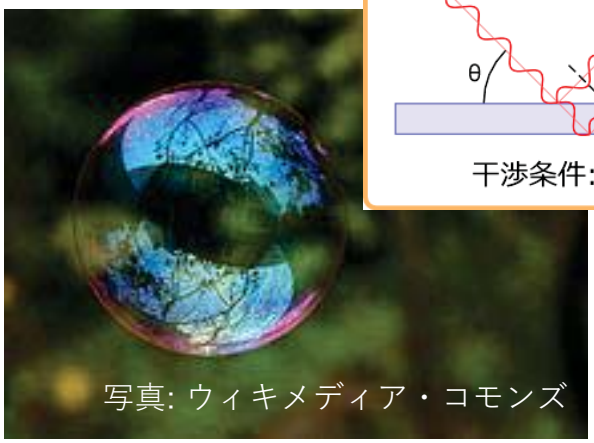
中性子とミュオンで摩擦を理解
～量子ビームによるトライボロジー研究～

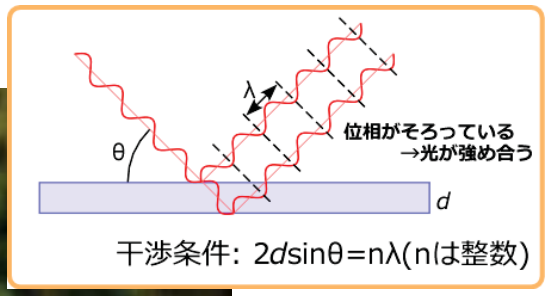
光・量子融合連携研究開発プログラム
中性子とミュオンの連携による「摩擦」と「潤滑」の本質的理解

trimn.kek.jp

量子ビームを用いた表面・界面の観察

中性子・ミュオンといった量子ビームを使うと表面・界面のナノ構造やその動き（ダイナミクス）を観察することができます。

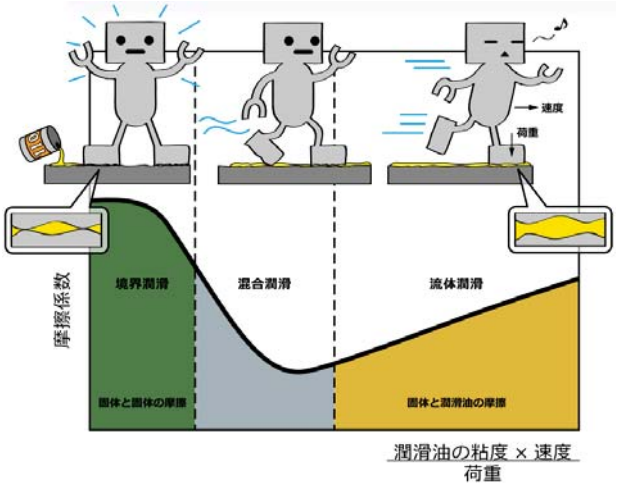




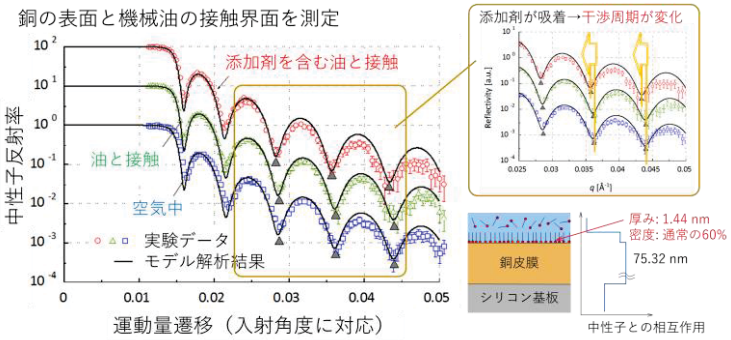
表面で反射した光と裏面で反射した光とが強め合う「干渉」が起きる条件を調べると膜の厚さを調べることができます。特に、X線や中性子の波長は非常に短く、ナノメートルスケールの構造を観察するのに適しています。

滑る・止まるを科学する　～トライボロジーへの応用～

我々の研究プロジェクト”TRIMN”では、中性子やミュオンを用いて摩擦の理解を目指します。



摩擦の大きさは速度に応じて変化します。例えば、中性子やミュオンを使って潤滑油に含まれる添加剤の挙動を調べることにより、エネルギーロスが小さい「流体潤滑」が起きるしくみを明らかにすることができます。



滑る・止まるを科学する トライボロジー

trimn.kek.jp

今をさかのぼること 4000 年前、エジプトでは超巨大建造物ピラミッドが建設されていた。ピラミッドは重さ数トンの石を積み上げた建造物で、これを組み上げるには石材を切り出して運搬する必要がある。そのまま石を運ぶのは相当な労力が必要だが、古代エジプトの人々は木製のソリやコロ、さらには油や牛乳を地面にまくなどして効率的に運搬していたと考えられている。これらの道具は今でも利用されているが、その原型が紀元前 2500 年に既に存在していたことは本当に驚くべきことである。そして、我々はこれらの道具を改良してより良い道具を造り出しているが、実は摩擦と潤滑のメカニズムは未だ完全には分かっていないのだ。

摩擦面における潤滑とは

家具の転倒防止や滑り止めなど、摩擦を利用したものは身の回りにたくさんある。一方、工業においては、エンジンやモーター、ギアやベアリングなどの機械を摩耗させたり、熱を発生させたりする厄介者だ。そのため、金属表面を覆って摩擦を軽減させる潤滑油が利用されている。接触面の状態は運動によって異なり、止まっている時には金属同士が直接接触しているが（境界潤滑）、動き始めると潤滑油が面に入り込み、摩擦係数が下がっていく（混合潤滑）。そしてさらに動きが速くなると、潤滑油によって面が完全に覆われて、劇的に摩擦を減少させる（流体潤滑）。つまり、エネルギーロスを抑えるには、摩擦係数を減らすだけでなく、いち早く流体潤滑領域へ到達させることが重要だといえる。

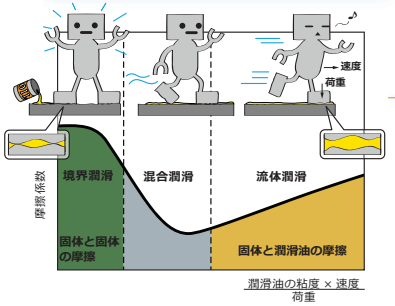


図 1 摩擦面における潤滑の分類

止まっている時：金属同士が接触。摩擦係数は高い（境界潤滑）
動き始め：潤滑油が摩擦面に入り込み、金属同士の接触が減ることによって摩擦係数は下がる（混合潤滑）
運動中：摩擦面が潤滑油によって完全に覆われ、劇的な摩擦係数の減少（流体潤滑）

タイヤのグリップ性と低燃費性 - 矛盾する性質の両立 -

工業製品に求められるのは低摩擦だけではない。例えば自動車のタイヤはブレーキをかけてから止まるまでの距離（制動距離）を短くするため、摩擦が大きくグリップ性の高いタイヤを設計する必要がある。その一方で、最近のタイヤには燃費を良くすることが求められており、走行中の摩擦（転がり抵抗）が小さいことが必要となる。低燃費タイヤには、高い摩擦のグリップ性と小さい転がり抵抗の低燃費性という矛盾を同時に満たす必要があるのだ。

ここで鍵となるのは運動と摩擦の関係。タイヤの場合、グリップ性を良くするには、素早く接触を繰り返す路面に対して、ゴムが激しく運動しエネルギーを吸収することが必要なのだ。一方、走行中の転がっているタイヤでは、ゴムがゆっくりと動きバネのようになることでエネルギーロスを抑える（図 2）。速い運動と遅い運動によるゴムの応答を制御できれば、グリップ性と低燃費性という相矛盾する低燃費タイヤになる。

そして、これらの問題を解決するための摩擦・潤滑の科学が「トライボロジー」である。

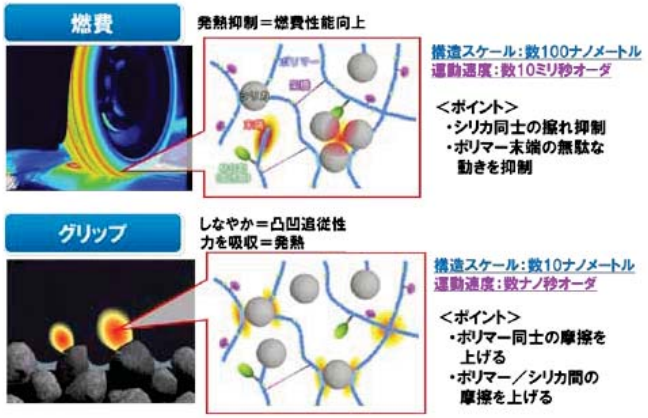


図 2 低燃費タイヤに求められる性能と、それに関わる分子のダイナミクス

中性子・ミュオンを用いたトライボロジー研究

摩擦・潤滑のメカニズムを根本的に理解するには、摩擦面を覆っている潤滑油の構造や、タイヤを構成するゴム分子の運動を観察することが鍵となる。しかし、驚くべきことに摩擦面を覆っている潤滑油は分子数層分（ナノメートル）の厚さしかないという。摩擦面という物と物との隙間で、かつこれだけ小さなスケールの構造を直接観察することは、現在の測定技術をもってしても非常に困難なのだ。測定の困難さは空間的な問題だけではない。タイヤはゴム分子の他にもフィラーと呼ばれる補強材が含まれており、これらが相互作用しながら動いている。この観測には広い時間・空間スケールが必要となるのだ。そのために、KEK 物質構造科学研究所の瀬戸秀紀教授は中性子・ミュオンを使ったトライボロジー研究のプロジェクトを立ち上げた。

中性子は物質の内部まで透過できる特徴を持つほか、試料に入る前後の速度の変化から、分子の動きを調べられる。これらを利用して、摩擦面における潤滑油の挙動やタイヤ中のゴム分子の動きが観察できる。

また、ミュオンを試料に打ち込むと試料内部でミュオンが崩壊するまでの動きを観測できる。これを利用すれば、タイヤ中で転がり抵抗に関係するゴム分子の動きを観測できる。中性子ではゴム分子の速い動きを、ミュオンでは遅い動きを見る。その時間スケールは、中性子では数ピコ秒（1 兆分の 1 秒）から数百ナノ秒（1000 万分の 1 秒）という非常に速い動きを、ミュオンでは数ナノ秒（10 億分の 1 秒）から数十マイクロ秒（10 万分の 1 秒）という中性子より遅い動きである。それぞれの特徴を活かしながら、対象に適した方法で観測していく。

測定技術の開発

摩擦面の観察には J-PARC（大強度陽子加速器施設）に設置されている中性子反射率計 SOFIA を使用する。摩擦面のナノスケール構造を観察するには、対向した面同士をナノスケールで平行にそろえる必要がある。例えば 1cm 四方の面を用意したとすると、0.00001 度ずれただけで両端の高さが 1 ナノメートルずれてしまう。そのため、なるべく狭い領域に中性子を照射する集光ミラーを開発し、それを摩擦面の観察に利用しようとしている（図 3）。

また中性子の既存の装置でタイヤ中のゴム分子の動きを見ようとすると、ゴム分子が部分的に動いている様子しか観察できない。そこで、ゴム分子全体が動くような比較的遅い動きも観察できる、「中性子スピンエコー分光法」という中性子のスピンを利用する分光器 VIN-ROSE を開発する（図 4）。

また、鉄などの磁性材料をフィラーとして利用することで、鉄の動きをミュオンで観察する、新しいアイディアも出ている。周りのゴム分子の動きによって引き起こされる鉄の運動をミュオンで観察した例は無く、実験と測定データの解釈について 1 から考察を行う必要がある。実現すれば低燃費タイヤの性能向上にむけた指針となるような現象を観察できる可能性があります 。

中性子・ミュオンを用いたトライボロジー研究を行うには、測定対象に合わせて実験装置・手法の開発が必要となる。このような最先端の実験手法は、トライボロジー研究のみならず、様々な応用分野への波及効果が期待できる。今回のプロジェクトを通してさらなる応用分野への発展をご期待いただきたい。

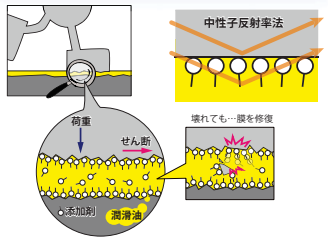


図 3 流体潤滑領域における皮膜形成とその観測

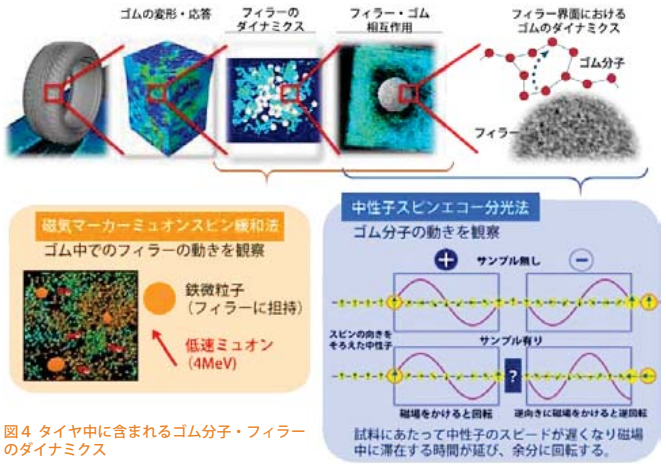


図 4 タイヤ中に含まれるゴム分子・フィラーのダイナミクス

トライボロジーとは、摩擦や潤滑といった、物と物が触れ合う場所で起きている現象を研究する新しい学問分野です。摩擦や潤滑といった現象は、私達の身の回りのあらゆる場所で起きています。しかし、摩擦が起きているまさにその場所、物と物が触れ合っている所で実際に何が起きているのかについては、まだわかっていないことがたくさんあるのです。

物と物が触れ合っている界面では、私達の目に見えるマクロの世界から分子や原子といったミクロの世界まで、様々なスケールの現象が複雑に絡み合って全体の現象を形作っています。その全体像を知るためには、一ミリの数十億分の一というナノスケールの世界で起きている現象を、物と物が触れ合った状態のまま観察することが必要です。

私達は、中性子やミュオンという特殊な「量子ビーム」を使って、この摩擦や潤滑という現象を明らかにしようとしています。中性子やミュオンはうまく制御することによって物と物が触れ合っているまさにその場所を観察することができ、原子や分子レベルでその構造と動きを解明することができるのです。

そこにはこれまで誰も見たことがなかった世界が広がっています。その世界で起きている現象への理解が進めば、様々な技術への応用が期待できるでしょう。さらには、新しい物理現象を見つけることができるかもしれません。中性子とミュオンを使ったトライボロジー研究は、科学と技術の両面で新しい扉を開く可能性を秘めているのです。