

学 位 論 文 題 名

Static Friction of Agar Gel/Glass System
– Mesoscopic Dynamics of Frictional Interface –

（寒天ゲル-ガラス界面における静止摩擦
– メソスケールにおける摩擦界面のダイナミクス –）

学位論文内容の要旨

滑り摩擦のなかでも物体間を潤滑しない場合の滑り摩擦を乾燥摩擦という。乾燥摩擦の研究の歴史は古く、Amontons-Coulomb の法則という経験則が成り立つことが 500 年程前から知られている。Amontons-Coulomb の法則とは、1) 摩擦力は見かけの接触面積には依存しない、2) 摩擦力は垂直荷重に比例する、などの内容からなる。この法則は、金属、岩石、紙、プラスチックなど様々な物質で成り立つことが知られている。また物体同士を接触させてからせん断外力を印加するまでの時間（待機時間）の対数に比例して静止摩擦力が増大する現象が知られている。この現象も、多くの物質で確認され、摩擦現象には物質の種類をこえた普遍性があるものとして注目されている。

この摩擦現象の普遍性は、摩擦界面の性質に起源を持つと考えられている。物体表面は巨視的に見ると平らでも、微視的に見ると小さな凹凸がある。このため、物体同士を接触させると、物体同士は見かけの接触面積全面で接触しているのではなく、表面の突起でのみ接触し、摩擦界面には多くの接触領域が形成される。これらの接触領域のダイナミクスが摩擦力の振る舞いや普遍性の起源と考えられている。しかし、これまでに行われた金属などの固体を用いた研究では、試料がかたく、外力に対する応答時間が短いため、接触領域の変化はくわしく調べられていない。

高分子ゲルは、高分子と溶媒からなる固体で、その組成の 90%以上が溶媒である。その弾性率は、典型的な金属の弾性率の値にくらべて、 $1/10^5$ 以下と非常に小さい。また外力に対する応答時間も長い。このため、これまでの研究では見えなかった接触領域の詳細な振る舞いを観察できると期待される。本研究の目的は、摩擦力の振る舞いを明らかにした上で、摩擦界面における接触領域を直接観察し、摩擦力の振る舞いを接触領域のダイナミクスからあきらかにすることである。このために、動摩擦に比べて、接触領域の振る舞いが摩擦現象により顕著に現れる静止摩擦力に着目した。本研究では、高分子ゲルの一種である寒天ゲルを試料として、以下の実験を行った。1) 走査型プローブ顕微鏡（SPM）によるゲル表面の凹凸と局所弾性率分布の観測。2) 寒天ゲルとガラス界面の静止摩擦力の測定および摩擦界面の直接観察。静止摩擦力の見かけの接触面積依存性や待機

時間依存性から、高分子ゲルの静止摩擦の性質を明らかにする。さらに、共焦点レーザー顕微鏡を用いた装置を独自に構築し、界面の反射像を取得することで、摩擦界面における接触領域の直接観察を行い、接触領域の存在および成長の様子を明らかにした。本実験を進めるにあたり、待機時間や垂直荷重、見かけの接触面積等を非常に詳細に制御する必要があるために、摩擦測定系を独自に考案し実験をおこなった。

摩擦界面をつくるゲル表面の形状と力学的性質を明らかにするために、SPM 観察を行った。これによりゲル表面は 200 nm 程度の凹凸があることがわかった。またゲルネットワークの不均一性を反映してその弾性率は 10 から 100 kPa 程度の分布があることがわかった。

待機時間一定のもとでの、寒天ゲルの水中での静止摩擦力は見かけの接触面積には依存しなかった。また静止摩擦力は垂直荷重を増加させると、単調に増加した。これらの実験結果から、寒天ゲルの静止摩擦力は、Amontons-Coulomb の法則を満たすことがわかった。このことは、金属などの固体と同様に、寒天ゲルとガラス板の間の摩擦界面で接触領域が形成されていることを示唆している。

次に、静止摩擦力の待機時間依存性を調べた。静止摩擦力は待機時間とともに増加した。待機時間を約 1000 倍にすると、静止摩擦力の値が約 10 倍になった。この静止摩擦力の変化は、金属などの固体の場合にくらべて大きい。このことは、真実接触面積の変化が大きく、直接観察の際にその変化を観察しやすいことが期待される。静止摩擦力の待機時間依存性は待機時間のべき乗でよく再現された。

静止摩擦力測定から示唆された接触領域が実在するのかを調べるために、共焦点レーザー顕微鏡を用いて寒天ゲル - ガラス板界面付近からの反射光を観察した。寒天ゲル、水の屈折率の僅かな違いによって、水 - ガラス界面からの反射光の方が、寒天ゲル - ガラス界面からの反射光に比べて強くなる。この違いを用いて、寒天ゲルとガラスの接触領域からの反射光強度の空間分布から接触領域を直接観察した。摩擦界面には、寒天ゲルとガラスが接触していることを示す反射光強度が弱い領域(暗い領域)が存在した。この領域の大きさは 100 ミクロン程度の大きさで、このような領域が点在していた。ゲルが滑ると、この暗い領域はゲルと同じ方向に移動した。このことから、この暗い領域が寒天ゲルとガラスの接触領域であるといえる。このことから静止摩擦力測定から示唆されたように、寒天ゲルはガラス板と接触領域でのみ接触していることを直接明らかにした。またこの暗い領域内からの反射は一樣ではなく、接触領域内に内部構造があることを示している。さらに、この観測した接触領域の複雑な形状は、SPM 観測から見られるゲルの表面の凹凸分布を単に反映するものではなく、接触に伴う新たな接触領域の集団的形成を示唆するものでもある。

次に、静止摩擦力の待機時間依存性の起源を明らかにするために、接触領域が待機時間の増加とともに、どのように時間変化するかを観察した。真実接触面積は待機時間とともに増加した。これは静止摩擦力の振る舞いに対応するものである。このことから静止摩擦力の待機時間依存性は、待機時間中に真実接触面積が増加することによることが明らかとなった。真実接触面積の増加は、新たな接触領域ができるためではなく、それまでにある接触領域が大きくなるためであった。

また水中での静止摩擦力測定との比較のために、表面の水をふき取った寒天ゲルと乾燥

したガラス板との間の静止摩擦力を測定した。この静止摩擦力は、見かけの接触面積にはほぼ比例し、垂直荷重にはほとんど依存しなかった。これは、水のない状況では寒天ゲルとガラス板の接触領域のみでは垂直荷重を支えきれず、寒天ゲルとガラス板が見かけの接触面積全面で接しており、摩擦力がゲルとガラスの凝着力によるものと考えられる。水中と水のない状況での静止摩擦力の振る舞いの違いから、水中では寒天ゲルとガラス板の接触領域だけでなく、摩擦界面の水も垂直荷重を支えていると考えた。このことを考慮すると、待機時間の増加にともなう静止摩擦力の増加は、垂直荷重を支えている水が界面の直接観察で見られた複雑な構造を示す接触領域から徐々に逃げ出すために起こると思われる。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	川 端 和 重
副 査	教 授	和 田 宏
副 査	教 授	八 木 駿 郎
副 査	助教授	根 本 幸 児
副 査	助教授	芳 賀 永

学 位 論 文 題 名

Static Friction of Agar Gel/Glass System — Mesoscopic Dynamics of Frictional Interface —

(寒天ゲル-ガラス界面における静止摩擦

— メソスケールにおける摩擦界面のダイナミクス —)

固体表面間を潤滑しない場合の滑り摩擦では、以下に示す Amontons-Coulomb の経験則が成り立つことが古くから知られている：1) 摩擦力は物体同士の見かけの接触面積には依存しない、2) 摩擦力は垂直荷重に比例する。この法則は、金属、岩石、紙、プラスチックなど様々な物質で、物質の種類と無関係に普遍的に成り立つことが知られている。固体同士は見かけの接触面積全面で接触しているのではなく、物体表面の凹凸等により摩擦界面には多くのメソスケールの接触領域が形成されるというモデルが提案されている。現在までに、応用上工学的な観点から多くの現象論的研究が進められてきたが、この接触領域の動的性質と摩擦現象の関係についての研究はほとんど進んでいない。しかし、最近、ハードデスクやマイクロマシン等の進展に伴い、接触表面の動的性質から摩擦現象を解明することが望まれている。他方、このような研究は、磁性ドメイン壁や転位等の多くの自由度を内在する集団の動的性質の理解につながるものでもある。

本論文は、界面ダイナミクスの観点から摩擦現象を解明するために、寒天ゲル-ガラス界面系に着目して、摩擦現象の普遍性の起源と考えられる接触領域を直接観察し、摩擦現象の解明を行なうことを目的とした。試料として、接触界面における変形や緩和がゆっくりと起こる高分子ゲルの一種である寒天ゲルとガラス界面のすべり摩擦系を用いた。本実験を進めるにあたり、待機時間や垂直荷重、見かけの接触面積等を詳細にかつ精密に制御・測定する必要があるために、摩擦測定系を独自に構築した。さらに、摩擦界面における接触領域の直接観察ができるように、共焦点レーザー顕微鏡を用いた接触領域観察装置を独自に考案した。

接触領域の動的な変化の観察が容易になるように、静止摩擦を詳細に調べた。寒天ゲルの

静止摩擦力は見かけの接触面積には依存しなかった。また垂直荷重を増加させると、静止摩擦力は単調に増加した。これらの実験結果から、寒天ゲルにおいても、静止摩擦力が固体と同様に Amontons-Coulomb 法則を満たすことがわかった。このことは、金属などに比べて非常にやわらかいゲルの摩擦界面にもかかわらず、固体と同様に接触領域が形成されていることを示唆している。さらに、接触後の運動開始までの待機時間とともに静止摩擦力は大きく増加した。

摩擦界面において、摩擦力の起源と考えられる接触領域がどのように形成されるかを観察するために、共焦点レーザー顕微鏡を用いて摩擦界面からの反射光の空間分布を観察した。寒天ゲルと水の屈折率の僅かな違いによって、水 - ガラス界面からの反射光の方が、寒天ゲル - ガラス接触界面からの反射光に比べて強くなる。この違いを用いて、摩擦界面からの反射光強度の空間分布から接触領域を直接観察することに成功した。摩擦界面には、寒天ゲルとガラスが接触していることを示す反射光強度が弱い(暗い) $100\ \mu\text{m}\Phi$ 程度の領域が点在していることがわかった。また、この暗い領域内からの反射強度は一様ではなく、接触領域内にさらに微細な内部構造があることも明らかにした。観測した接触領域は、原子間力顕微鏡等により観測したゲル表面の凹凸よりも 100 倍以上大きなスケールであるため、凹凸のある表面と平らな表面との単なる接触により接触領域が形成したものではないといえる。このことから、接触に伴う接触領域の集団的形成が起きていると考えられる。接触領域が待機時間の増加とともに成長することを明らかにした。さらに、1000 秒にもわたる長い待機時間依存性の起源として、界面の接触領域における水の効果を明らかにしている。

以上のように、著者は、摩擦現象の普遍性の起源と考えられる摩擦界面の接触領域の動的性質を直接観察することができるゲル-ガラス界面系を発見し、この系においてメソスケールにおいて接触領域が特徴的な生成・成長現象を観測することに成功した。この結果は、工学的な摩擦現象の機構解明のみならず、内部に多くの自由度を持つ系のダイナミクスを解明する研究に新たな方向性を示すものである。よって、審査員一同はこれらの成果を評価し、著者は、北海道大学博士(理学)の学位を授与される資格があるものと認める。