

2012.11.06-08

京都大学基礎物理学研究所研究会

「摩擦、レオロジー、地震の新展開-異なる階層と舞台をつなぐ-

口頭講演概要

11月6日(火)

13:05 - 14:05	講演者： 森 誠之 (岩手大学工学部)
題目： 工学的な立場からミクロな摩擦・潤滑挙動を理解する	
<p>摩擦特性は滑り合う固体の接触界面の構造に依存している。弾性流体潤滑では液膜の構造が粘度特性を介して潤滑特性に関与する。液膜の構造とは、ヘルツ接触部における高圧やせん断の影響下で形成される油膜であり、固液界面の構造も潤滑特性に影響する。一方、境界潤滑では摩擦特性に関与する境界潤滑膜が様々な潤滑条件下で作られ、また摩擦により潤滑膜が失われる。すなわち、現実の潤滑条件下では、摩擦と言う力学的なエネルギーの作用下で境界潤滑膜の生成と破壊が起こり、摩擦条件下で作られた定常的な潤滑膜が摩擦を制御している。境界潤滑膜は摩擦面における反応いわゆるトライボ化学反応により生成し、境界膜の形成因子は、潤滑油成分のほか、摩擦材料、潤滑条件（荷重と摩擦速度）および湿度など環境成分が挙げられる。ここでは工学的な立場から潤滑膜と摩擦特性との関係について概説する。</p>	

14:05 - 14:35	講演者：八木 和行 (同志社大学工学部)
題目： 直鎖系潤滑油における弾性流体潤滑油膜の特異形状	
<p>転がり軸受や歯車などの外接接触下での潤滑状態である弾性流体潤滑 (Elastohydrodynamic lubrication: EHD) 状態は、圧力が数 GPa まで上昇し、その結果、表面の弾性変形および潤滑油の粘度が著しく増加する状態である。さらに、滑りが存在すると、潤滑油膜に作用するせん断率は 106 /s 程度にまで容易に到達する。その結果、潤滑膜内でのレオロジー特性はニュートン流体ではなく、非ニュートン流体として振舞う。EHD 状態での油膜厚さの計測が古くから行われており、その結果、典型的な油膜形状が広く認識されている。しかしながら、分子構造が単純な構造を持ち、融点が明確に定義される試薬を用いた場合、油膜形状が従来より認識されているものにならず、これまでまったく予測されていなかった形状になることが近年明らかになった。本研究では、直鎖系試薬を用いた場合の特異油膜形状の計測結果およびその発生機構について述べる。</p>	

15:00 - 16:00	講演者： 平塚 健一（千葉工業大学工学部）
題目： 摩耗機構の解析	
<p>摩耗によって固体表面が減量していく摩耗という現象は、いまだに定式化し難いのが現状である。その理由は、摩耗そのものが実際に摩擦する材料表面の機械的・化学的性質を変化させるからであり、また、その過程に影響を及ぼす因子およびそれらの相互関係が完全にはわかっていないからである。本講演では摩耗機構理解の現状として次の観点、すなわち、材料の機械的・化学的性質の役割、雰囲気の種類と湿度の効果、摩擦条件、特に摩擦方向、摩耗粉、摩擦時間、非摩擦時間などの影響について、摩耗過程の微視的観察を含めて論じる。</p>	

16:00 - 17:00	講演者： 大槻 道夫（青山学院大学理工学部）
題目： マクロな弾性体の滑り摩擦	
<p>滑り摩擦に関しては古来より様々な研究があるが、多くの基本的問題が未解決のまま残されている。例えば、滑り摩擦の基本法則として、摩擦力が物体に加えられた垂直荷重に比例するというアモントン則が知られているが、この法則の成立機構や条件については、未だに確固たる理解がなされていない。近年、これらの研究において大きな進展がある。その1つは、摩擦のきっかけとなる摩擦界面での局所滑りの発生とその伝搬、そしてそれがマクロな運動につながる過程を実験的に見ることができるようになったことである。</p> <p>このような滑り摩擦の素過程を理論的に理解するために、我々は弾性体の解析計算を行い、そうした局所滑りの挙動が、ある種の安定性解析から理解できることを発見した[1]。さらに、局所的な滑りの大きさによってマクロな摩擦力がスケールされることも発見した。このことから、摩擦の基本法則として知られているアモントン則が、ある条件で系統的に破れることが予言される。この予言の成立は最近の実験で確認されている。</p> <p>講演では、近年のマクロな系での滑り摩擦の実験的・理論的な発展のレビューを行うとともに、我々の理論的な結果と実験との対応についても詳細に議論したい。</p> <p>[1]. M. Otsuki and H. Matsukawa, arXiv:1202.1706</p>	

17:00 - 17:30

講演者： 中野 健（横浜国立大学大学院環境情報研究院）

題目： スティックスリップ再考：ミスアラインメント角の効果を中心に

巨大地震の源は、大陸プレートと海洋プレートのスティックスリップであると言われている。一般にスティックスリップは、「静摩擦」による固着と「動摩擦」によるすべりが交互に現れる間欠的な運動として理解されているが、駆動面の駆動方向と従動面の運動方向の間にミスアラインメント角を考慮すると、（静摩擦を必要とせず）動摩擦のみでスティックスリップの典型的な挙動の多く（波形、振幅、周波数、発生限界）を説明できることがわかった。本モデルは、地震をはじめとする様々なスケールのスティックスリップを考察する新たな最小構成要素モデルを提供するとともに、これまで静摩擦によるものと理解されていた現象の一部が（実は）動摩擦により現れていた可能性を示唆するものである。

11月7日(水)

8:50 - 9:40	講演者： 藤田 博之 (東京大学生産技術研究所)
題目： ナノ物体を見ながら擦り、その摩擦を測る	
<p>半導体マイクロ・ナノ加工で作るMEMSデバイスと、ナノ物体を可視化できる透過電子顕微鏡(TEM)を組み合わせた計測系を構築し、ナノ接合やナノ物体を対象に応力による変形、表面や固相内の拡散、量子的な電気や熱の伝導などを総合的かつ実時間で測定した。ナノ物体の形状変化に対する電気機械特性の依存性を詳細に観測し、分子動力学などを用いたシミュレーションと比較することで、様々な微視的機構の解明を試みている。具体的には、ナノ接合のせん断破壊特性、異種材料間の拡散現象、電気接点劣化機構、ナノ領域における熱伝導特性、ナノ繊維や長鎖状分子の電気機械特性、などについて研究を進めている。今回は、ナノ接合のせん断破壊機構(ナノトライボロジー)と巨視的摩擦の関係についての実験と理論からのアプローチを紹介する。</p>	

9:40 - 10:10	講演者： 川勝 英樹 (東京大学生産技術研究所)
題目： 元素コントラスト AFM におけるラテラルモード	
研究会会場にて配布	

10:10 - 10:40	講演者： 佐々木 成朗 (成蹊大学理工学部)
題目： ナノスケール接着・剥離における摩擦の科学	
<p>接着・剥離現象は、微細機械の稼働や力学分光、破壊における亀裂の進展など幅広い現象と関係が深い。我々のグループではグラフェン、カーボンナノチューブ、フラーレン、シリコンクラスターが形成する種々のナノ構造の力学特性や摩擦特性に着目して研究を進めている。最近では試料表面に吸着したナノカーボンやシリコン探針の接着・剥離・せん断過程を、理論的側面(分子力学・動力学シミュレーション)と実験的側面(原子間力顕微鏡測定やMEMS測定)の両方から研究している。本講演ではこれまでの研究を整理しながら研究の現状を紹介する。</p>	

11:00 - 11:50	講演者： 大熊 哲（東京工業大学大学院理工学研究科）
<p>題目：超伝導ボルテックス系のピン止めと運動： 新しい非平衡ダイナミクスと動的相転移</p>	
<p>(より詳しくは概要集最後をご覧ください。)</p> <p>ピン止めポテンシャルの下で駆動させた固体が、速さと共にどのような動的状態変化を示すかは興味ある問題である。これは弾性格子と乱れた媒質とからなる散逸系における非平衡問題であり、実験的には電荷密度波や超伝導渦糸（ボルテックス）格子、あるいは固体間の摩擦現象といった様々な系や状況下で広く現れる[1]。ここでは超伝導渦糸系を例にとり、この問題を考えていく。渦糸間には斥力が働くため、ピン止めが弱い場合には渦糸は Abrikosov 格子と呼ばれる三角格子構造をとる。ランダムなピン止め中心をもつ渦糸格子系に駆動力を徐々に印加すると、ある閾値で渦糸はピン止めからはずれ(depinning), その後は駆動力、渦糸間の斥力、ピン止め中心からの引力、そして粘性力で決まる運動をする。低速域では乱れた plastic flow[2]となるが、速度の増加と共に渦糸系が感じる動的ピン止め力は弱まり、渦糸間の相互作用だけで決まる格子秩序が回復する。これを動的秩序化という[3]。</p> <p>本講演では、駆動した渦糸系で観測されている depinning, plastic flow, 動的秩序化、あるいは avalanche 現象[4]に関するレビューを行った後、最近我々が見出した、新しい動的相転移・非平衡ダイナミクス—depinning/可逆不可逆転移[5]と速度増大に伴う格子方位の回転[6]—を紹介する。本講演を通し、超伝導渦糸系が、相互作用しながらランダムポテンシャル中を運動する多粒子系の非平衡ダイナミクスや動的相転移を研究するための格好の実験系となること、さらに固体の plastic flow や tearing 現象[7]（より広くはレオロジーや摩擦現象）を、渦糸構造のミクロな視点から解明するという新たな研究手法となることを示したい。</p> <p>[1] 大熊哲, 井上甚, 小久保伸人, 固体物理 44, 1 (2009): A. Maeda et al., Phys. Rev. Lett. 94, 077001 (2004): N. Hosomi et al., Phys. Rev. B 75, 064513 (2007): H. Matsukawa et al., J. Phys.: Conf. Ser. 89, 012007 (2007).</p> <p>[2] M.C. Miguel, S. Zapperi, Nat. Mat. 2, 477 (2003): G.W. Crabtree, Nat Mat. 2, 435 (2003): SO et al., Phys. Rev. B 76, 172503 (2007): 77,212505 (2008).</p> <p>[3] SO, H. Imaizumi, N. Kokubo, Phys. Rev. B 83, 064520 (2011): 80, 132503 (2009): Y. Togawa et al., Phys. Rev. Lett. 85, 3716 (2000): N. Kokubo et al., Phys. Rev. Lett. 88, 247004 (2002).</p> <p>[4] SO, M. Kobayashi, M. Kamada, Phys. Rev. Lett. 94, 047003 (2005): E. Altshuler, T. H. Johansen, Rev. Mod. Phys. 76, 471 (2004).</p> <p>[5] SO, Y. Tsugawa, A. Motohashi, Phys. Rev. B 83, 012503 (2011): SO, Y. Kawamura, Y. Tsugawa, J. Phys. Sos. Jpn. 81 (2012), in press.</p> <p>[6] SO, D. Shimamoto, N. Kokubo, Phys. Rev. B 85, 064508 (2012).</p> <p>[7] P. Moretti, M.C. Miguel, Phys. Rev. B 80, 224513 (2009): SO, Y. Yamazaki, N. Kokubo, Phys. Rev. B 80, 230501(R)(2009).</p>	

11:50 - 12:20	講演者： 野村 竜司（東京工業大学大学院理工学研究科）
題目： 乱れのもとで進行する 4He 量子結晶の雪崩的成長と冪乗則	
<p>熱揺らぎが無視できる極低温で、どの様に一次相転移が進行するのかが重要な問題である。4He を用いた研究により、バルク中では巨視的量子トンネル効果で超流動液体中に結晶が核生成することが知られている。しかし低温極限での一次相転移に対する、乱れの効果は良く分かっていない。我々はエアロジェル中での 4He の結晶化過程を直接可視化することにより、この問題にアプローチした。</p> <p>高温域ではエアロジェルによる乱れを熱的に乗り越え、マクロな固液界面が滑らかに進行し結晶化した。低温域では、結晶がエアロジェル中のいたるところで、雪崩的に核生成した。乱れと熱揺らぎの競合による結晶成長様式の動的転移を観測したと思われる。</p> <p>エアロジェル中での結晶成長速度の測定も行った。高温域では温度の低下とともに遅くなり、熱活性型の依存性を示した。更に冷却すると成長速度は、中間温度で極小値をとったのち少し増加し、低温域では温度変化しなかった。低温域では巨視的量子トンネル効果によってポテンシャルを超えていることを示唆する結果である。また低温域での雪崩のサイズ分布を調べたところ、サイズに対して冪的依存性を示し、系が自己組織化臨界状態にあることを示した。低温での量子的成長は、核生成確率の直接測定によっても独立に確かめられた。</p> <p>冪的依存性が見られる領域が、低温から動的転移点に近づくとき狭まる振る舞いが見られた。古典系で系統的測定が困難な散逸の影響が、このような量子系での温度依存性として捉えられたとすると興味深い。</p> <p>また最近、温度掃引による実験により、昇温しても降温しても結晶が成長するという特異な結果も観測したので報告したい。</p>	

13:30 - 14:30	講演者： 山田 真爾（花王株式会社 栃木研究所）
題目： 固体平板間における液体超薄膜の構造化とナノトライボロジー機構	
<p>固体平板間に挟まれた液体は、平板間距離（液体の膜厚）が分子のオーダーに近づくときバルク液体とは大きく異なる動的物性を示す。液体分子の狭空間内での幾何学的充填や固体表面への吸着等によって分子運動性が大幅に低下した結果、超薄膜状態の液体は流動性を失い、せん断に対して固体的な応答を示すことが実験と理論の両面から明らかになってきている。本講演では、平滑表面間における液体超薄膜の構造とナノトライボロジー特性の実験的解析に大きな役割を果たしてきた表面力測定装置（Surface Forces Apparatus, SFA）を取り上げ、その実験技術とこれまでに得られてきた代表的な知見について概説する。さらに、SFA を用いて超薄膜液体の固化と静摩擦挙動について検討した我々の研究について紹介する。</p>	

14:30 - 15:00

講演者： 平山 朋子（同志社大学工学部）

題目： **摩擦低減に寄与する添加剤吸着層の物理化学物性評価**

境界潤滑状態において、固体表面に形成される添加剤吸着層はその摩擦低減に大きく寄与する。本発表では、中性子反射率法（NR）、水晶振動子マイクロバランス法（QCM）、赤外反射吸収分光法（IR-RAS）、角度分解 X 線光電子分光法（AR-XPS）等によって得られた金属表面に吸着する油性剤吸着層の物理化学物性について、近年の研究動向を交えて概説する。

11月8日(木)

9:00 - 10:00	講演者： 波多野 恭弘 (東京大学地震研究所)
題目： 断層の摩擦法則へむけて	
<p>摩擦現象はその時空スケールに固有の特性を持つ。本研究会においては原子分子スケールでの摩擦をはじめとしてソフトマターの摩擦などさまざまなスケールでの摩擦が紹介されるであろうが、本講演はおそらく最大スケールの摩擦、すなわち断層の摩擦法則についてレビューを行い、摩擦法則のスケール依存性について一般的な展望を得ることを目的とする。</p> <p>地震学において、断層の摩擦特性は断層すべりの加速度を決定する主要因である。そして弾性論によれば断層すべりの加速度は地震波の強度を決定するため、災害予測という点からみても重要な研究テーマとなっている。もちろん断層を使って実験は出来ないので、実験室スケールにおける岩石摩擦に関する知見をいかにして断層スケールまで外挿するのかという理論的な取り扱いが中心となる。本講演ではまず岩石実験レベルで成り立っている摩擦法則を紹介したのち、そのスケール依存性を明らかにするいくつかの理論について批判的検討を加える。</p>	

10:00 - 11:00	講演者： 廣野 哲朗 (九州大学工学研究院)
題目： 断層掘削計画の最前線：地震性滑り時の物理化学	
<p>地震現象を理解するための取り組みの1つとして、地震を引き起こした岩石もしくは地震によって変形した岩石、すなわち断層岩の破壊強度や応力-歪み特性、摩擦係数などの物理特性の定量的な評価と、岩石の破壊と摩擦の物理という視点での研究展開が求められる。しかし、地震での破壊域(震源域)は内陸型の場合、地下数 km から 20 km 程度、海溝型の場合、海溝底付近から 40-50 km 程度と地下深部に位置するため、直接、地表にて震源断層を調べることはできない。そこで、掘削によって地下深部に位置する断層に直接到達し、回収した断層コア試料を測定あるいは解析、さらには掘削孔井を用いた地殻応力や間隙水圧などを測定する研究プロジェクトが行われている。本発表では、断層掘削研究の主な例として、1999年台湾集集地震を引き起こしたチェルンプ断層の掘削(TCDP)を紹介しつつ、これらの研究を通して明らかになってきた地震時の断層での滑り挙動と動的弱化機構、及びそれらの物理化学的側面について紹介したい。</p>	

11:20 - 12:20	講演者： 川村 光 (大阪大学大学院理学研究科)
題目： 地震の統計物理的モデル：その臨界性と固有性	
<p>地震の統計力学的モデルの諸性質について、最近の数値シミュレーションの結果を主に紹介する。その際、特に、</p> <p>(i) 地震の本性は、「臨界的」か「固有的」か？</p> <p>(ii) アスペリティはどのような条件で出現するのか？その本性は？</p> <p>(iii) 大地震は破壊核形成過程を伴うのか？伴うとすると、その性格は？、</p> <p>といった問題意識のもとに、お話ししたい。対象モデルとしては、バネ-ブロックモデル (Burridge-Knopoff model) と OFC モデルを取り上げる。前者については、摩擦構成則として、単純な速度弱化則と速度状態依存摩擦則の双方の場合につき紹介する予定である。</p>	

12:20 - 12:50	講演者： 柳谷 俊
題目： 地震現象の解明をめざした岩石の摩擦実験の問題点：歴史的な回顧	
<p>①岩石の摩擦実験装置。②剛性と摩擦の構成則との関係。③マイクロなすべりとマクロなすべりの関係。④岩石試料の圧縮载荷における破壊的断層 (すべり) 面の形成と先在すべり面をもつ不安定すべり現象との相違。⑤いったい、ばね - スライダーモデルは地震現象の何をシミュレートしているか？等について論じる。</p>	

ポスター講演概要集

ポスター：1	講演者： Damiron Denis (LIMMS Institute of Industrial Science , Kawakatsu lab.)
題目： AFM with chemical contrast and its application in lateral force microscopy	
研究会会場にて配布	

ポスター：2	講演者： 中野 憲 (東京大学生産技術研究所)
題目： TEMAFM を用いた摩擦研究 —垂直振動印加による摩擦低減のその場観測—	
<p>近年、ナノスケールのプローブ先端の摺動接点から微小電流を印加することで超高密度に情報を記録したり、光学リソグラフィーを凌駕する微細パターンの描画を行ったりする技術が盛んに研究されている。しかし、これらの技術の工業的実用化を考えた場合、プローブ接触荷重の増大とプローブ先端摩耗低減という二律背反する要求を両立することが望ましい。その要求を達成し得る可能性の一つとして挙げられているのが、Lantz ら (IBM 社) が 2009 年に発表した、微小振動印加によるプローブ先端摩耗性改善である。</p> <p>本研究会では、超高真空 TEMAFM を用いたその場観察によって、微小振動印加による摩擦・摩耗の低減効果と、それによる通電の喪失有無に関する調査結果を報告する。</p>	

ポスター：3	講演者： 鳥山 陽平 (東京大学生産技術研究所)
題目： ラテラル液中 AFM によるフォースカーブを用いた固液界面の計測	
<p>液中 AFM(Atomic Force Microscopy)の研究において、ラテラル及び垂直モードによって純水内のマイカを原子分解能で撮像することに成功している。さらにラテラルモードでは 10°C 付近においてマイカ表面に数 nm の溝状の構造物が次第に埋まっていく現象が観察されている。特に液中においては水の介在によって探針の動きにより両モードの撮像環境へ及ぼす影響が異なることが予想されるが、その実態は明らかになっていない。</p> <p>そこで本研究では AFM において一般的に試料と探針間の相互作用の評価に用いられるフォースカーブ(試料探針間の距離と探針の共振周波数変化)の、ローディング速度による両モードの形状変化の傾向、撮像時の作動点との関係、温度依存性について実験及び考察を行う。</p>	

ポスター：4	講演者：村上 弘明（東京大学生産技術研究所）
題目：液中 AFM におけるラテラルモードと垂直モードの比較	
<p>液中 AFM(Atomic Force Microscopy)の研究では、ラテラルモードと垂直モードのどちらの利用でも、純水内でマイカの原子像を得ることに成功している。特に、探針先端を試料表面に対して水平に振動させるラテラルモードの利用では、10℃付近において試料表面で数 nm の溝が徐々に埋まっていく様子等の特徴的な像が観測されている。しかしながら、このラテラルモードの撮像と垂直モードの撮像がどのような関係であるのかは明らかになっていない。</p> <p>そこで、本研究ではラテラルモードと垂直モードの同時励振が可能な液中 AFM を開発した。これを用いて、ラテラルモードと垂直モードのそれぞれの励振、及び双方同時の励振状態で、探針と試料の間に働く相互作用力を示すフォースカーブを測定し比較することで、両モードの関係性を議論する。</p>	

ポスター：5	講演者：加藤 弘気（青山学院大学理工学研究科）
題目：ナノスケール突起間の凝着、引っ張り・剪断破壊、摩擦	
<p>実際の物体の表面は、どんなに滑らかに見えていても、細かくみると様々な高さのナノスケールの凸凹がある。2 物体を接触させた場合、表面全体が接触しているわけではなく、表面の凸(微小突起)同士が接触している。その接触点を真実接触点と呼ぶ。このような場合において一方の物体に力を加え、動かそうとすると摩擦力が生じる。これは、接触した凸同士の間で凝着が起こっており、その凝着を切る力が必要になるからである。このようなナノスケールにおける摩擦の振る舞いは、小型機械の制御などに関わるとても重要な問題である。</p> <p>近年、TEM(Transmission Electron Microscope)と MEMS(Micro Electro Mechanical System)を用いた実験により、原子スケールにおける真実接触点の形成、変形、破壊が確認され、また接触点の間で原子の移動が確認された[2]。</p> <p>本研究では、この実験をもとに微小突起の接触→引き離し、接触→剪断の振る舞いについて、計算機シミュレーションを行った。温度、接触面にかかる力、剪断速度などを変化させ、接触点の変形、変形に伴う原子の移動の様子、摩擦力の振る舞いを調べた。その結果、実験と同様に微小突起間での原子の移動が確認できた。更に、突起が変形する瞬間に発生する特徴的な力、ポテンシャルエネルギーの変化が見られた。</p> <p>[1]松川 宏：摩擦の物理, 岩波書店(2012)</p> <p>[2]T. Sato, T. Ishida, S. Nabeya, and S. and H. Fujita, Journal of Physics: Conference Series 258 012005 (2010)</p>	

ポスター：6	講演者：一ノ瀬 祥一（静岡県立大学食品栄養科学部）
題目： Geometric Approach to Quantum Statistical Mechanics and Application to Casimir Energy and Friction	
<p>A geometric approach to general quantum statistical systems (including the harmonic oscillator) is presented. It is applied to Casimir energy and the dissipative system with friction. We regard the $(N+1)$-dimensional Euclidean $\{it\ coordinate\}$ system (X^i, τ) as the quantum statistical system of N quantum (statistical) variables (X^i) and one $\{it\ Euclidean\ time\}$ variable (τ). Introducing paths (lines or hypersurfaces) in this space (X^i, τ), we adopt the path-integral method to quantize the mechanical system. This is a new view of (statistical) quantization of the $\{it\ mechanical\}$ system. The system Hamiltonian appears as the $\{it\ area\}$. We show quantization is realized by the $\{it\ minimal\ area\ principle\}$ in the present geometric approach. When we take a $\{it\ line\}$ as the path, the path-integral expressions of the free energy are shown to be the ordinary ones (such as N harmonic oscillators) or their simple variation. When we take a $\{it\ hyper\text{-}surface\}$ as the path, the system Hamiltonian is given by the $\{it\ area\}$ of the $\{it\ hyper\text{-}surface\}$ which is defined as a $\{it\ closed\text{-}string\ configuration\}$ in the bulk space. In this case, the system becomes a $O(N)$ non-linear model. We show the recently-proposed 5 dimensional Casimir energy (ArXiv:0801.3064,0812.1263) is valid. We apply this approach to the visco-elastic system, and present a new method using the path-integral for the calculation of the dissipative properties.</p>	

ポスター：7	講演者：糸魚川 文広（名古屋工業大学）
題目： 単分子吸着膜の繰返し摩擦による力学応答挙動	
<p>潤滑油中の添加剤吸着膜のモデルとして、Decane に浸漬した Si 基板上の SAM 膜を AFM 探針で繰返し摩擦した場合の力学応答挙動を調べた。SAM 膜の配向状態、形態(島状、一様膜)による繰返し摩擦時のひずみ応答、摩擦係数の変化から、吸着膜への機械的刺激が吸着膜の状態変化に与える影響を推察した。</p>	

ポスター：8	講演者：宇都宮 翔（青山学院大学理工学研究科）
題目： 剪断されたナノスケール潤滑剤層の計算機シミュレーション	
<p>潤滑剤は、固体の滑り面間に導入することにより、固体表面の直接接触を防ぎ摩擦、摩耗を抑制する物として幅広い分野で活用される。しかし固体の凹凸により潤滑剤が数分子層程度まで薄い領域が存在する場合、摩擦力は急激に上昇してしまう。この状態を境界潤滑状態と呼ぶ。この現象は物質表面からくる周期ポテンシャルと狭い空間に閉じ込めようとする力により、潤滑剤分子が固化してしまう事が原因と考えられている。潤滑剤が固化した状態で剪断力を加えると、潤滑剤の秩序構造が崩れ潤滑剤分子は液化するが、剪断力が弱まる事で再び固化する。この固化と液化を繰り返す事で Stick-Slip 運動が観測されると考えられている。</p> <p>本研究では境界潤滑状態における潤滑剤の構造と摩擦力の関係を、コンピューターシミュレーションにより解析を行った。圧力を加えている状態での固体?液体間の相転移温度や潤滑剤分子の結晶構造と摩擦力との相関、分子に働く相互作用の変化によるそれらの変化について調べた結果を報告する。</p>	

ポスター：9	講演者：井上 大輔（電気通信大学大学院）
題目： 水晶振動子により滑り距離を制御した動摩擦力の測定	
<p>我々は水晶マイクロバランスと原子間力顕微鏡を組み合わせた摩擦力顕微鏡の開発を行っている。この装置は水晶振動子を用いることでナノスケールで基板の滑り距離を制御し、共振振動数とQ値の変化から基板に働く応力やエネルギー散逸を測定することができる。グラファイトおよびフラーレン基板について、基板のポテンシャル周期を境にエネルギー散逸の基板振幅依存性が大きく変化することが明らかになった。</p> <p>我々は水晶マイクロバランスと原子間力顕微鏡を組み合わせた摩擦力顕微鏡の開発を行っている。この装置は水晶振動子を用いることでナノスケールで基板の滑り距離を制御し、共振振動数とQ値の変化から基板に働く応力やエネルギー散逸を測定することができる。グラファイトおよびフラーレン基板について、基板のポテンシャル周期を境にエネルギー散逸の基板振幅依存性が大きく変化することが明らかになった。</p>	

ポスター：10	講演者： 藪中 俊介（京都大学大学院）
題目： 分子の配向自由度を取り込んだマイクロ相分離系の構造レオロジーの理論	
<p>マイクロ相分離の弱偏析極限では、濃度のみの自由度を考慮した構造レオロジーの理論があるが、逆格子ベクトルが単一の長さのみを持つ単純な構造（ラメラ、ヘキサゴナル、BCCなど）では、線形の範囲で、構造の変形に起因する粘性応力が記述できない問題があった。われわれは分子の配向自由度を取り込んだ理論を構築し、マイクロ相分離系での構造レオロジーを計算した。</p>	

ポスター：11	講演者： 堤 貴明（千葉工業大学工学研究科）
題目： 高分子の摩擦発光に対する雰囲気圧力効果	
<p>本研究は、高分子材料の摩擦発光に対する雰囲気圧力の効果を明らかにすることを目的とする。真空チャンバー内にピン・オン・ディスク摩擦試験機を導入し、アルミナボールと各種高分子材料を8種類の窒素圧力中で擦り、その時の発光量を測定した。その結果、窒素雰囲気圧力が100Paのときに発光量が最大となるという結果を得た。これは、高分子材料の摩擦発光が放電発光が主体であり、メカニズムが統一的に説明される可能性を示唆している。</p>	

ポスター：12	講演者： 田所 千治（横浜国立大学 環境情報研究院）
題目： 液晶の特異なレオロジーを利用した摩擦損失の最小化	
<p>一般的に、摩擦抵抗を低減するためには、流体潤滑域ではより低粘度の基油を選ぶことが望ましい。ただし、基油を低粘度にすることで負荷能力が低下するので、油膜が破断して摩擦抵抗が増大する混合潤滑域がより高い速度から始まる。つまり、摩擦抵抗の低減に要求される基油粘度は速度域によって相反するので、全速度域にわたって低摩擦化することはできない。</p> <p>この問題を解決する方法として、粘性の異方性を有する液晶を潤滑剤として用いた潤滑システム[1]が挙げられる。せん断流れ下において、液晶を固体表面に対して垂直配向させる表面を用いた場合、せん断流れによる流れ配向作用と、表面アンカリング効果をもたらす曲率弾性の作用とが競合するので、速度×膜厚が減少するにつれて実効粘度が増加する。この液晶の実効粘度変化を潤滑システムに利用すれば、流体潤滑域では低粘度を示し、混合潤滑域に入る直前で自発的に高粘度に変化して摩擦抵抗の最小領域を拡大する『スマート潤滑システム』が実現できる。</p> <p>本研究では、液晶の自発的な実効粘度変化を検証するために、光干渉油膜厚計測法[2]を用いて液晶性 EHL 膜の膜厚におよぼす速度の影響を調べるとともに、偏光顕微鏡を用いて液晶の配向状態を調べた。</p> <p>[1] Nakano, K., Tribol. Lett., 14 (2003) 17. [2] Johnston, G. J., Wayte, R., and Spikes, H. A., Tribol. Trans., 34 (1991) 187.</p>	

ポスター：13	講演者：江端 宏之（東京大学理学部）
題目：懸濁液界面における孤立パターンの粒径依存性について	
<p>垂直加振下の懸濁液界面においては、安定な穴や分裂する穴などの孤立パターンが現れることが報告されている。しかし、どのような物理量がパターンの分岐に重要なのかは分かっていなかった。我々は粉体の粒径や間隙流体の表面張力を変え実験を行った。その結果、粉体に働く毛管力がパターンのダイナミクスを決めるうえで重要な役割を果たしていることを発見した。発表では粉体の粒径が懸濁液のレオロジーに与える影響と孤立パターンとの関係性についても議論したい。</p>	

ポスター：14	講演者：山口 哲生（九州大学工学部）
題目：ハイドロゲルのすべり摩擦における応力 - 拡散結合	
<p>ハイドロゲルのすべり摩擦においては、応力 - 拡散結合という非局所的な効果を考慮すると、ゲル表面の摩擦係数が試料サイズに強く依存するという特異な結果が導かれる。本研究では、ハイドロゲルの形状を工夫するだけで低摩擦材料を実現できた例など、ハイドロゲルのすべり摩擦現象に関する実験・理論の両面からの最近の研究成果を報告する。</p>	

ポスター：15	講演者：山口 哲生（九州大学工学部）
題目：凝着摩耗の動力学理論	
<p>凝着摩耗においては、シビア - マイルド遷移や焼き付きなど、興味深い過渡現象が存在するが、それらを説明する理論的研究は全くと言っていいほどなされていない。本研究では、上記のダイナミクスに対する説明を試みるべく、摩耗における複数の素過程を考慮した動力学モデルを提案する。</p>	

ポスター：16	講演者：前川 覚（名古屋工業大学）
題目：弾性体の摩擦における局所すべりと最大静摩擦力	
<p>静摩擦と動摩擦の遷移に関する問題は、物理学や地震学やトライボロジーなど、複数の学問領域で研究がなされてきた。とりわけ、地震の予知や摩擦の発現機構の解明に向けて、静摩擦から動摩擦への遷移の瞬間における接触界面の高時間分解能計測が重要視されている。実際に、巨視すべりにともなう剪断破壊の高速伝播過程や巨視すべりに先行して発生する局所すべりの存在などが明らかとなり、これまで見逃されてきた新たな知見が得られつつある。</p> <p>本研究では、上述した界面力学現象と最大静摩擦力の関係を検討した。具体的には、スライダをばねとダンパで連結された多数の質点によりモデリングした多自由度クーロン摩擦モデルを用いて、弾性体のすべり摩擦シミュレーションを行った。その結果、バルクが容易に変形する弾性体のすべり摩擦においては、局所すべりにともなう内部ひずみの局所的な解放が最大静摩擦力を決定する重要な因子であることを見出した。すなわち、最大静摩擦力は、真実接触面積や真実接触部の剪断強さといった界面の因子のみに依存するものではなく、バルク剛性や接触剛性といったシステムパラメータにも強く依存することが明らかとなった。</p>	

ポスター：17	講演者：片野 祐（青山学院大学理工学研究科）
題目：弾性体の滑り摩擦実験	
<p>近年、弾性体の摩擦を伴う運動の滑り面で起こる変化を観測する実験[1]-[3]や計算機シミュレーション[3][4]が行われている。その結果、系全体の滑りの前に局所的な滑りが起こっており、その伝播によって系全体が滑り出すことがわかった。また、弾性体の解析的計算によって、系全体の静摩擦係数がサイズと圧力に対して減少するという結果が得られた[4]。この結果は、局所的にはアモントンの法則（摩擦力は荷重に比例し、見かけの接触面積に依らない）に従うとした有限要素シミュレーションでも確認されている[4]。これは、系全体ではアモントンの法則が破れていることを示している。</p> <p>本研究では、アクリルブロックで作られたスライダーと基板を重ねて垂直荷重をかけ、接線荷重を加えて押し、スライダー—基板間の真実接触面の変化を観測した。その結果、系全体の滑りの前に局所的な滑りが起こっていることが確認された。そして、局所的な滑りの伝播の荷重依存性と押し込み速度依存性を調べた。また、系全体の滑りが起こる際の接線荷重と垂直荷重から得られる静摩擦係数の荷重依存性を調べたところ、実験においても垂直荷重に対して静摩擦係数が減少するという結果を得た。</p> <p>[1] S. M. Rubinstein, G. Cohen and J. Fineberg, Nature 430, 1055 (2004) [2] S. M. Rubinstein, G. Cohen and J. Fineberg, Phys. Rev. Lett. 98, 226103 (2007) [3] S. Maegawa, A. Suzuki and K. Nakano, Tribology Lett. 38, 313 (2010) [4] M. Otsuki and H. Matsukawa, arXiv:1202.1716</p>	

ポスター：18	講演者：桃園 聡（東京工業大学大学院理工学研究科）
題目： エラストマーの凝着を考慮した摩擦モデル構築の試み	
<p>ソフトマターの一種であるエラストマーにおいて、凝着現象を主因とした摩擦現象は、低いすべり速度で支配的となることが知られている。しかし、エラストマーの凝着による摩擦現象は、表面のエラストマー分子鎖による付着現象という分子スケールの現象から、粗さ突起先端部で生じる動的な固体間凝着現象、粗面の統計的な接触というマクロな現象までの様々なスケールの現象で生じる現象が相互に影響を及ぼしあいながら、エネルギー散逸しているものである。この現象を、中間スケールである粗さ突起（an asperity）の凝着部に着目し、そこを分子スケール・マクロスケールをつなぐための中間スケール（メゾスケール）と位置づけ、そこでの動的固体間凝着現象による散逸機構に、両スケールの現象を組み込むという形でモデル化を行い[1]、そこで仮定した中間スケールでの散逸機構については、ラージモデルを用いた実験によって検討を行った[2]。それらを中心とした研究成果を報告する。</p> <p>[1] S. Momozono, K. Nakamura and K. Kyogoku, J. Chem. Phys.,132 (2010),114105. [2] S. Momozono et al., Tribol. Intn., 48 (2012), 122.</p>	

ポスター：19	講演者：長澤 光晴（東京電機大学工学部）
題目： 摩擦に対する縦波振動の効果	
<p>接触している2つの物体を滑らせようとする場合、界面には前駆的な滑りや、ある種の波が発生することが知られている。我々は、波を物体へ積極的に導入することで摩擦力を制御出来るのではないかと考え、予備的な実験を行った。今回の実験では、直方体の銅棒（100mm × 8mm × 8mm）の一端に圧電素子を取り付け、圧電素子を正弦波的に振動させることによって棒の長さ方へ縦波振動を導入した。また、棒を水平に置いた木の板の上に乗せ、棒の他端に取り付けた糸を一定の速さで引き、糸の張力を測定して摩擦力とした。圧電素子の振動の周波数を様々に変えて摩擦力の測定を行ったところ、（1）棒の共鳴周波数近傍で静止・動摩擦力はともに大きく減少する。（2）（1）から外れた周波数での摩擦力は圧電素子を振動させない場合とほぼ同じであることが分かった。講演では、共鳴状態にある物体の摩擦について議論する予定である。</p>	

ポスター：20	講演者：野村 健斗（青山学院大学理工学部）
題目：ヴァイオリンの弦の振動と弓との摩擦	
<p>ヴァイオリンの弦の振動に関しては多くの研究がある。はじめてヴァイオリンの弦の振動の観察に成功したのは Helmholtz である。Helmholtz は弦に白い点をつけ、弦の一部を顕微鏡で観察した。Helmholtz はこの実験を通して、以下の 3 つの事項を発見し、その 3 つが成り立つ時の振動を Helmholtz 振動と名付けた。</p> <p>(a) 瞬間的な弦全体の形は、1 つの折れ曲がり点と 2 本の直線になる。</p> <p>(b) 折れ曲がり点は上下 2 つの放物線の作る閉ループを 1 方向にまわる。</p> <p>(c) 折れ曲がり点から下ろした垂線の足は両固定端の間を等速で往復運動する。</p> <p>ヴァイオリンは擦弦位置、弓の速度、弓の圧力によって、Helmholtz 振動になるかどうかが決まる。</p> <p>そこで本研究では、実際のヴァイオリンの G 線を用いて、最大静摩擦係数、動摩擦係数、減衰係数のパラメータを求め、Helmholtz 振動の成り立つ条件が擦弦位置、弓の速度、弓の圧力によってどのように決まるかを、数値計算により調べた。</p>	

ポスター：21	講演者：稲垣 紫緒（東京大学大学院理学系研究科）
題目：回転する二重円筒系での粉粒体の自発的分離の時空間パターン	
<p>水平に置いた透明な円筒容器に大きさや形の異なる 2 種類の粒子を封入して回転させると、粒子が円筒の軸方向に縞状に分離する現象が現れることがよく知られている。我々は、二重円筒容器にほぼ完全に粒子を充填して回転させることによって、新たな時空間パターンの観察に成功した。さらに、円筒容器を開封し内部の分離状態の直接観察を行った。円筒の外側での時空間パターンと内部の分離状態について、一重円筒の場合と比較して、そのダイナミクスについて考察する。</p>	

ポスター：22	講演者：吉岡 直樹（京都大学基礎物理学研究所）
題目：粉体の蠕動輸送における相転移	
<p>管の蠕動運動による粉体粒子系の輸送特性を離散要素法により調べた。蠕動による管のボトルネック部分の幅を変えたところ、ある臨界幅より狭めると定常流の振る舞いが流量の大きな unjammed flow から流量の小さな jammed flow に転移することを見出した。</p>	

ポスター：23	講演者：佐野 友彦（京都大学基礎物理学研究所）
題目：粉体ジェット衝突における摩擦現象	
<p>粉体ジェット衝突実験において、粉体流が完全流体に近い状態になっているという報告がある。我々は3次元シミュレーションによって粘性率は有限で運動論が予測する値と同程度であるから両者の類似性は表面的である事を見いだした。2次元の粉体ジェット衝突では、3次元の場合と比べて粒子が充填しやすいために、運動論の使えない高密度の流れが生じる事が期待される。構成方程式や摩擦係数の歪み速度依存性等を議論する予定である。</p>	

ポスター：24	講演者：嵐 博隆（青山学院大学理工学研究科）
題目：回転型実験装置による摩擦実験と Stick-Slip 運動	
<p>「摩擦」は身近な物理現象であり地震もその1つである。特にプレート間地震は、プレート間に粉粒体が詰まっているため、粉粒体の摩擦現象として捉えることができる。</p> <p>本研究では、摩擦の発生機構を調べていくことを目的とし、Dalton らの実験を参考に粉粒体と接した基盤の Stick-Slip 運動を観測・解析する実験を行う。その結果スリップの規模別頻度分布に、Gutenberg-Richter 則にみられるような冪乗則が成り立つこと、スリップの大きさとその周期に相関関係が見られることなどがわかった。 "</p>	

ポスター：25	講演者：西尾 幸祐（青山学院大学理工学研究科）
題目：粉体の摩擦シミュレーション	
<p>粉体とは、粉や粒などの集合体のことである。粉体を構成する粒子は目に見える程度の大きさの固体である。集合体として砂山のように形を保つことができるが、ちょっとした変化により土砂崩れのような流動的な振る舞いもする。この粉体特有の現象は、地震とも密接に関係している。2つのプレートの間には「ガウジ」と呼ばれる粒状の岩くず（粉体）が介在物として存在する。そのため、地震は粉体の摩擦と考えることができる。また、地震には一定の範囲でマグニチュードと発生回数との間に Gutenberg-Richter 則と呼ばれる冪乗則が成り立つことが広く知られている。</p> <p>本研究では、粉体を上下基盤で挟んで、下基盤を一定速度で駆動することで、バネを介して固定された上基盤にどのようなスリップが発生するか「粒子要素法（DEM）」を用いてシミュレーションを行った。その結果、スリップの大きさとその発生回数との間に、一定の範囲で冪乗則が成り立つことがわかった。しかし、全ての粉体粒子の直径が基盤粒子と同サイズの場合には、この冪乗則は成り立たなかった。これらを含め、今回の発表では、粉体粒子の直径を変化させることで冪乗則がどのように変化したか報告する。</p>	

ポスター：26	講演者：佐藤 大介（大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻）
題目：速度状態依存摩擦則に従う粘弾性層付き1次元バネ-ブロックモデルによる地震の数値シミュレーション	
<p>地震の統計的性質を解析する標準的なモデルとしてバネ-ブロックモデルがある。これまでにバネ-ブロックモデルを用いたシミュレーションは多数行われてきたが、地震の統計的な法則の一つである大森則に従うような余震の再現できていなかった。現実の断層には、粘弾性層と呼ばれる、応力を蓄積し徐々に解放する層が存在する。この層が大地震後の余震の発生に重要であるという考えもある。</p> <p>本研究では、この粘弾性層を表現したモデルを用いてシミュレーションを行なった。その結果、大地震直後の余震の発生が確認できた。それらの統計的な性質について報告する。</p>	

ポスター：27	講演者：植田 祐史（大阪大学大学院理学研究科）
題目：速度状態依存摩擦則を用いたバネ-ブロックモデルにおける破壊核形成過程	
<p>地震における断層破壊は、通常、弾性波速度に近いような高速で伝播する。しかし、破壊の最初期にはゆっくりと破壊が進行する破壊核形成過程が存在すると言われる。断層面をバネでつないだブロックの集まりと近似するバネ-ブロックモデルを用いたシミュレーションにおいて、破壊核形成過程の様子を調べたので、報告する。"</p>	

ポスター：28

講演者：内出 崇彦（京都大学 防災研究所）

題目：自然地震における破壊成長のスケーリング則

実験室スケールで得た知見を自然地震まで結びつけるためには、スケーリング則が重要な手掛かりとなる。本発表では、規模の異なる自然地震の解析によって得られたスケーリング則を紹介する。古くから知られるスケーリング則は、破壊域の面積など地震の最終的な状態に関するものである。基本的には、断層の長さ・幅、平均断層滑り量が互いに比例する、自己相似モデルで記述できる(例えば、Kanamori and Anderson, BSSA, 1975)。一方、変形様式が主に温度によって決まることから、地震が発生する層(地震発生層)は各地域で特定の深さまでしか存在できない。この地震発生層の限界によって、自己相似的な性質が損なわれることも知られている(例えば、Scholz, BSSA, 1982; Romanowicz, GRL, 1992) 近年では、破壊の時間的な変化に対するスケーリング則も提案されており、地震学的データによる裏付けが進められている。Uchide and Ide [JGR, 2010]は、米国カリフォルニア州パークフィールド地域で発生した Mw 1.7 - 6.0 の6つの地震の断層すべりインバージョン解析を行い、モーメント関数(各時刻での周囲の岩石の剛性率、断層面積、断層すべり量の積)を得た。その結果、各地震の破壊の前半では、モーメント関数は時間の3乗に比例する成長が見られた。これは、自己相似的な破壊成長モデルから期待されるものである。断層面積が時間の2乗、平均断層すべり量が時間にそれぞれ比例することが期待されるからである。解析した6つの地震のうち、Mw 6.0の地震だけは破壊領域が地震発生層の限界まで達している。破壊領域が地震発生層の限界に達した時刻で、モーメント関数が時間の3乗に比例する成長から、時間そのものに比例する成長に切り替わっている。地震発生層のサイズが効いて、自己相似性が崩れるのである。さらに、世界各地の大地震の解析結果をと同様の手法により比較して、地震発生層の限界による効果を確認しており、それについても併せて報告する。

ポスター：29	講演者：光藤 哲也（東京大学地震研究所）
題目：簡単な地震のモデルにおける大地震の起こり方	
<p>大地震がどのように起こるのかは関心が高い問題であると同時に未だわかっていない部分も多い問題である。我々はこの問題に対して簡単なモデルのシミュレーションを行うというアプローチで研究を行っている。我々が今回用いるのは一次元と二次元の forest-fire モデルで、このモデルは応力の増大とトリガーによるその開放により起こる地震を再現する。さらに我々は断層の不均一性を考慮して地震の発生開始点の分布の異なるモデルを導入した。このモデルで起こる地震の中で系の大きさに比例する特徴的な大地震をシステムサイズ地震と呼び、その平均頻度やその大偏差関数を計算してその起こり方を調べた。大偏差関数は揺らぎに関する量で、レアな場合の確率を与える。本発表では、それらの結果を踏まえつつ、システムサイズ地震の間の時間間隔分布に焦点を当てて報告する。複数モデルを考えるがいずれの場合も時間間隔分布はピークを持つことがわかったが、地震のトリガーの割合に依存して分布の形が変わることもわかった。</p>	

ポスター：30	講演者：津川 暁（早稲田大学）
題目：地震統計におけるマルチフラクタル関係式	
<p>2001-2007 における日本・台湾・南カリフォルニアにおける地震の統計データを基に導出されたマルチフラクタル関係式について紹介する。マルチフラクタル関係式は地震のマグニチュードと発生間隔を結合する関係式であり大小どんな地震にも成り立つと期待されている。3.11 東日本大地震のデータ解析においてもマルチフラクタル関係式が表れていることを示す。</p>	

ポスター：31

講演者：三井 雄太（北海道大学理学研究院）

題目：東北地震直後に破壊域北側で生じた余効的断層すべりの速度

"2011年東北地方太平洋沖地震では、宮城沖の海溝近くにおいて、最大50メートル以上にも及ぶ断層すべりが数分間で生じ、そのすべり速度は1m/sのオーダーと考えられている(例えば Yagi and Fukahata, 2011)。そのような地震破壊が停止するのは必ずしも容易なことではない。

Mitsui and Heki (submitted)では、震源北側(三陸沖)の領域に注目し、陸上のGPS観測点の変位データを解析した。その結果、本震破壊の収束後から津波到来に伴う沿岸観測点のデータ消失に至るまでの約25分間の間に、三陸沖の広い範囲において、平均して約20cmの断層余効すべりが生じていたことがわかった。そのすべり速度は平均すると0.1mm/sのオーダーとなる。この0.1mm/sという値は、摩擦の速度依存性という観点から興味深い。例えば Weeks(1993)は、室内実験の結果を基に、いわゆる速度状態依存摩擦則(RSF)における状態発展が無視できるようになるカットオフ速度を0.01-0.1mm/s程度と見積もっている。Mitsui and Cocco(2010)は、0.1mm/sのカットオフ速度を採用したRSFと、間隙流体の摩擦発熱およびガウジのせん断変形に伴う流体圧変動を考慮した単純なバネ-ブロックシステムによる数値実験を行い、実際の断層運動のアナログモデルとして提示している。定性的には、断層すべり速度がカットオフ速度のオーダーを上回ると摩擦の動的弱화가起こり、より高速のすべりを生じるシステムである。以上のように、GPSから見積もられた東北地震の余効すべり速度は、室内実験から示唆されていた現象論的RSF則のカットオフ速度と同程度であった。このことは、東北地震の本震破壊の停止(と余効的変動への遷移)が、主に摩擦の速度依存性によってコントロールされたことを示唆している。"

超伝導ボルテックス系のピン止めと運動：新しい非平衡ダイナミクスと動的相転移

東工大院理工

大熊 哲

ピン止めポテンシャルの下で駆動させた固体が、速さと共にどのような動的状態変化を示すかは興味ある問題である。これは弾性格子と乱れた媒質とからなる散逸系における非平衡問題であり、実験的には電荷密度波 (CDW) や超伝導渦糸 (ボルテックス) 格子, あるいは固体間の摩擦現象といった様々な系や状況下で広く現れる [1]。ここでは超伝導渦糸系を例にとり、この問題を考えていく。渦糸間には斥力が働くため、ピン止めが弱い場合には渦糸はAbrikosov格子と呼ばれる三角格子構造をとる。ランダムなピン止め中心をもつ渦糸格子系に駆動力を徐々に印加すると、ある閾値で渦糸はピン止めからはずれ(depining), その後は駆動力、渦糸間の斥力、ピン止め中心からの引力、そして粘性力で決まる運動をする。低速域では乱れたplastic flow[2]となるが、速度の増加と共に渦糸系を感じる動的ピン止め力は弱まり、渦糸間の相互作用だけで決まる格子秩序が回復する。これを動的秩序化という[3]。本講演では、駆動した渦糸系で観測されているdepining, plastic flow, 動的秩序化, あるいはavalanche現象[4]に関するレビューを行った後、最近我々が見出した、以下の新しい非平衡ダイナミクス・動的相転移を紹介する。試料は弱いランダムな点状ピン止め中心をもつアモルファス $\text{Mo}_x\text{Ge}_{1-x}$ 膜で、印加電流が駆動力、発生電圧が渦糸系の平均速度に対応する。

1 Depinning転移

DepiningはCDWやコロイド系、電子結晶など自然界に広く見られる現象で、磁壁やfluxの運動を用いるスピントロニクスや超伝導デバイスの基礎ともなる、応用面でも重要な現象である。最近のシミュレーションにより、depining転移が臨界緩和を伴う動的相転移であること、さらに次項で述べるabsorbing転移などと同じユニバーサリティクラスに属することが示された[5]。我々はdepining転移の実験検証を目指し、渦糸系を用いた過渡現象測定を行った[6]。はじめに少数の渦糸しかピン止めされていない初期状態 (シミュレーションで扱われた状態) と多くの渦糸がピン止めされた2つの初期状態を準備し、(定常状態でのdepining電流 I_d を越える) 直流電流 I を急激に印加し、電圧の過渡現象を測定した。前者の系では、電圧はシャープに立ち上がった後、一定値 $V^{mf} (>0)$ に向かって減衰する。これは、はじめは多くの渦糸がflowするが、運動中に渦糸が徐々にピン止めに捕まり、定常状態に向かうためである。これに対して後者の系では、電圧はゼロ付近から立ち上がり、徐々に上昇しながら一定値 V^{mf} に向かって緩和する[7]。これは、はじめはほとんどの渦糸がピン止めされていてflowに寄与しないが、ピン止めから外れた渦糸がピン止めされている渦糸に衝突することにより、次々とピン止を外しながら定常状態に向かうためである。両者の系で過渡的振舞いは異なるが、 V^{mf} に向かう緩和時間はほぼ近い値をとり、両者の緩和時間は I の関数として共に I_d でべき発散することがわかった。これはdepining転移の強い証拠である。

2 可逆-不可逆転移 [Reversible-Irreversible Transition (RIT)]

Pineらは周期駆動されたコロイド粒子系において、RITと呼ばれる新しい動的相転移を報告した[8]。これは十分なサイクルが経過した後の定常状態において、駆動振幅 d がある臨界値 d_c 以下だと各サイクル後にすべての粒子は元の位置に戻る（可逆状態）が、 d_c を越えると元の位置に戻らなくなる粒子が現れる（不可逆状態）こと、さらに定常状態へ向かう緩和時間が存在し、それがこの臨界値 d_c で発散するという2つの実験事実に基づく。可逆領域で見られる緩和現象は、粒子がつぎの衝突を避ける配置に自己組織化するランダム組織化の考えを用いて説明されている。この現象は、相互作用する多粒子系が時間発展と共にカオスになるか秩序状態になるかを決定する問題にもつながるともいわれ注目されている[8]。さらにRITは、前項のdepinning転移や、absorbing転移と呼ばれる動的相転移（山火事や感染等、多様な系で出現すると予想されている）と類似の現象であることが提案されている[9]。コロイド系以外の多粒子系でもRITが観測されるかどうかは大変興味もたれる。

そこで我々は、円周上を往復運動する渦糸系のダイナミクスを調べた[6]。まず電圧ノイズ測定により、RITを示唆する振幅 d の閾値 d_c が存在すること、さらに定常状態へ向かう緩和時間が存在し、それが d_c で両側から発散することを見出した。これは d_c がRITの転移点である強い証拠である。また発散の臨界指数がdepinning転移およびabsorbing転移の理論で予想される値とほぼ一致した。このことは、RIT、depinning転移とabsorbing転移が同一のユニバーサルリティクラスに属することを示唆する[6]。さらに、微視的構造に着目すると、可逆状態は渦糸格子に、不可逆状態は格子中に格子欠陥が発生した状態に対応することが明らかになった[10]。この実験結果は、周期運動する弾性固体中に発生した格子欠陥が不可逆的plastic motionを出現させるという、より一般的な物理描像[11]と一致する。

3 速度増大に伴う動的秩序化と格子方位の回転

運動方向の格子の周期性を検出できるモードロック（MLR）共鳴法[1,3]という測定手法を用い、速度増大に伴うplastic flowからelastic flow（渦糸格子）への動的秩序化を観測した。ところで、運動するAbrikosov格子がいかなる結晶方位をとるかという問題は、1973年のShmidt-Heuger理論以来、数多くの理論家によって議論されてきた超伝導における未解明の基本的な重要問題だが、これまで測定手法がなかった[12]。我々はMLRを用い、フロー方向に対する結晶方位を速度の関数として調べたところ、ある臨界速度で三角形の1辺がフロー方向に垂直な方位から平行方位（フロー方向が最近接）へ回転することを観測した[13]。興味深いことに、このとき渦糸が1格子進むのに要する時間 $\tau_{\text{th}} \approx 10$ nsは格子間距離によらない。渦糸は超伝導が壊れた場所へ進む方がエネルギー的に得であるため、もし先行する渦糸の超伝導が回復する前に後続の渦糸が接近することができれば、この機構により最近接の平行方位をとる。つまり τ_{th} は渦糸の超伝導が回復する準粒子寿命を反映する[13]。本実験により、高速運動する渦糸格子では、フロー方向の渦糸間には実効的引力が働くことが明らかになった。一方、より普遍的な視点からこの現象を説明できる可能性もある[14]。

本講演を通し、超伝導渦糸系が、相互作用しながらランダムポテンシャル中を運動する多粒子系の非平衡ダイナミクスや動的相転移を研究するための格好の実験系となること、さら

に固体のplastic flowやtearing現象[11] (より広くはレオロジーや摩擦現象) を, 渦糸構造のミクロな視点から解明するという新たな研究手法となることを示したい。

- [1] 大熊哲, 井上甚, 小久保伸人, 固体物理**44**, 1 (2009): A. Maeda *et al.*, Phys. Rev. Lett. **94**, 077001 (2004): N. Hosomi, A. Tanabe, M. Suzuki, M. Hieda, Phys. Rev. B **75**, 064513 (2007).
- [2] M.C. Miguel, S. Zapperi, Nat. Mat. **2**, 477 (2003): G.W. Crabtree, Nat. Mat. **2**, 435 (2003): SO *et al.*, Phys. Rev. B **76**, 172503 (2007): **77**, 212505 (2008).
- [3] SO, H. Imaizumi, N. Kokubo, Phys. Rev. B **83**, 064520 (2011): **80**, 132503 (2009): Y. Togawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **85**, 3716 (2000). N. Kokubo *et al.*, Phys. Rev. Lett. **88**, 247004 (2002).
- [4] SO, M. Kobayashi, M. Kamada, Phys. Rev. Lett. **94**, 047003 (2005): E. Altshuler, T. H. Johansen, Rev. Mod. Phys. **76**, 471 (2004).
- [5] C. Reichhardt, C. J. Olson Reichhardt, Phys. Rev. Lett. **103**, 168301 (2009).
- [6] SO, Y. Tsugawa, A. Motohashi, Phys. Rev. B **83**, 012503 (2011).
- [7] SO, A. Motohashi, New J. Phys (2012), submitted.
- [8] D. J. Pine *et al.*, Nature **438**, 997 (2005): L. Corte *et al.*, Nat. Phys. **4**, 420 (2008).
- [9] N. Mangan, C. Reichhardt, C. J. Olson Reichhardt, Phys. Rev. Lett. **100**, 187002 (2008): PNAS **108**, 19099 (2011).
- [10] SO, Y. Kawamura, Y. Tsugawa, J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012), in press.
- [11] P. Moretti, M.C. Miguel, Phys. Rev. B **80**, 224513 (2009): SO, Y. Yamazaki, N. Kokubo, Phys. Rev. B **80**, 230501(R)(2009).
- [12] A. Schmid, W. Hauger, J. Low Temp. Phys. **11**, 667 (1973): N. Nakai *et al.*, Physica C **469**, 1106 (2009).
- [13] SO, D. Shimamoto, N. Kokubo, Phys. Rev. B **85**, 064508 (2012).
- [14] H. Matsukawa *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. **89**, 012007 (2007):