

物性研だより

第39巻
第6号

2000年3月

目 次

物性研を離れて一年経って	白石潤一	1
物性研究所研究会シリーズ「物性研究の展望」報告		
○「表面・人工物質における物性科学のフロンティア」		4
物性研究所短期研究会報告		
○「多自由度系の運動と摩擦の物理」		60
世話人 松川 宏, 三本木 孝, 川端和重, 高山 一, 河野公俊, 鈴木敬愛, 塚田 捷, 宮下精二, 前田京剛, 鈴木 勝, 石渡信一, 白濱圭也		
物性研究所談話会		147
物性研ニュース		
○ 人事異動		149
○ テクニカル・レポート 新刊リスト		150
○ 物性研だより 第39巻目録(第1号~第6号)		152
編集後記		

東京大学物性研究所

ISSN 0385-9843

物性研を離れて一年経って

白石潤一

結構歩いたと思う。

学内の異動ということでなのか、駒場の数理科学研究科の部屋の鍵を渡されたのは四月まであと一週間という時期であったように記憶する。友人のH氏の自家用車で引越しを頼んであったのだが、その前に少しでも荷物を移しておこうと思い、六本木から駒場まで何度も歩いて通った。もちろん、電車でゆけばすむところをわざわざ歩いて、それで別にどうしたかったという訳でもないが、とにかくそういう気分であった。四月から始めなくてはいけない理科一類一年生の解析学の講義ノートを、いったいどう組み立てればいいのか、そればかり考える毎日であったからか、歩いているうちに、そして道端の風景に接しているうちにより考えが浮かぶだろう、ひょっとするとそういう期待からではなかったかとも思う。

物性研究所のある六本木、青山のあたりは、そのころにはもうすでに見慣れていた。渋谷を過ぎて松濤、駒場へ来ると、何年も足をふみ入れなかったその場所が、自分の記憶の彼方から浮かび上がってきた景色とほとんど違うことなく次々符合していくことに、やはり驚きを禁じえなかった。やっぱりここなんだな、そう感じた。しかし、この辺を歩いている学生たちはどうしてあんなに若いのだろう、いや、子供のようにしか見えない、ということに気付かされた。自分が当時あのように無邪気にやっていたかどうかは知らない。本郷で七年(その間の一年を京都で過ごしたが)その後、六本木で四年、どうしようもないような漠然とした研究を続けるうちに十年以上経過している。

最初は素粒子論を研究するという目標を掲げたが、実験と理論の溝を感じたのかどうかして、二次元の場の理論の統計物理への応用を調べてみることにしたのではなかったかと思う。当時は二次元の共形場の理論の廃れかかった時代であった。物理的な興味は調べ尽くされた、だれもがそう感じ、そう発言していた。その環境で自分が流された先が、一次元スピン模型であった。そのとき、京都大学では「表現論主義」とでも呼べる数理物理が展開されていて、一次元スピン模型や二次元古典統計模型を、リー代数の表現論だけで処理しようとする(彼らの仕事をうまく評する言葉は知らないが)「工場」が稼働していた。そのときは残念だと思ったが、その工場の職人になるにはやはり時期がすこし遅かったようで、傍らに小さな「脇本表現小屋」という表現論の研究所を建て京都に一年強下宿した。幾つかの理由から、数理物理の研究に意欲をなくした時期であったから、隣の「本工場」の操業には一度も触れる事なく小屋をたたんで東京に戻った。

共形場の理論を、質量がある場の理論へ変形することを試みたのは博士課程を終えた時であったろうか。理学部一号館は新築のためプレハブ小屋に研究室があった。その小屋での研究は今でも懐かしく思い出される。その夏、もっと本格的な物性の研究を始める決心をした。数理物理屋の都合に合わせた虫のいい研究ではなく、もっと正しい物性研究を目指そうと思った。六本木での四年半

は実に楽しかった。触れるものはみな、自分にとって新しいことばかりであった。甲元先生のおかげで世界の物理学者達と触れ合うことができ、共同研究もいくつか行った。とりわけ、アビシヤ先生との心のこもった交流はなにより勝るものであり、また、真木先生とおつき合いをさせて頂く機会を得て、超伝導について多くの実験家の先生方と話すことが出来た。

結論めいたことを言えば、自分の掲げた「正しい物性の研究」というのは、単なるスローガンに終わってしまったのかもしれない。一度は決別を誓ったはずのあのプレハブ小屋での研究が、自分の意志に反してその後も勢力を増加させつづけたから、二足のワラジを履くような、なにか後ろめたい気持ちがついていた。

十数年という時間をかけて一体自分は何をやってきたのだろうか？駒場のキャンパスを埋め尽くすあの子供たちのあどけなさを、自分も持っていたかもしれない。だが、その後、何度も何度も挫折したので、もう彼らのような純粋な気持ちをどこかに忘れてしまったのだろうか？彼らは、遊びたいときに遊び、勉強したいときにすればよい、そんな気ままなことをしてよい人達なのである。一方自分はどうかであるか、そう自問した。研究したいことも、能力なのか好機に恵まれないのかままならず、遊びたいだけ遊んでいるということは許されない。もちろん、彼ら駒場の学生と今の自分を比較することは、土台意味のないことであり、理不尽極まりないことは良く判っている。彼らだって、数年後には世の中に自力で漕ぎ出さねばならない時が必ず来る。自分がうまく漕げなくて疲れ果てることもあったことと、楽しそうに疲れを知らずはしゃいでいる練習生の元気な彼らとを比べるなど、もともと意味がないのだから。

彼らのような考え方、感じ方を忘れてしまった今の自分に、心の底から納得してもらえるような解析学の講義ができるのかどうか？そういう疑念にさいなまれた。

駒場に着任してほぼ一年経過した。解析学の講義も、冬学期の試験を残すのみとなった。研究のことも他のことも、一切に優先して講義のことを考えた。一週間ずっと講義の材料集め、組み立てのことばかり考えていた。通勤の行き帰り、歩きながら頭の中で何度も定理の証明、例題の計算を反復した。そのうちふと、こう思った「これでは、落語家がネタ繰をしているのと同じではないか。」

このような努力は、自分の無知から来ているのではあるが、少し弁解するとすれば次のような事情によるともいえる。微分積分、つまり解析学というのは、各事項の相関が極めて高く、羅列式ではうまく整理されない。もちろん、公理的な立場を取る故に、問題の点を幾つかの定理に分割して証明する。それが一列に並んでいるようならばそれでよかったのだが、多くの場合は森や林の様相を呈しているので、自分が講義で取り上げるつもりがあるかないかにしたがって、いらぬものを徹底的に刈ってやらなければいけないし、かといって、必要な枝まで落してしまえば、あとで非常に困る。こういうのが、「噛み砕く」ということなんだな、と思った。そういう作業を通じて、「数学の心」を少し学べたような気がする。

数学の心とは、オイラーさんやガウスさんがやったように、「音楽でも聞こえてきそうな楽しい式を、子供のように素朴な心で追いかける、そういう心」だと思う。それ以外の瑣末なこと、煩わしい事、ましてや、計算の練習の為だけの計算などは、何であっても数学の心からもっとも距離のはなれたところにあるものだと思う。そういうことを、少しでも学生に伝える事ができたならば、それ以上の幸せはない。

自分が学生の時の気持ちに戻れて、そして彼らの事を十分理解できるようになったとは思えない。しかし、冗談をいったときには笑ってくれたり、練習問題を楽しんで解いてくれたりするときには、よかったな、と思う。

物性研究所研究会シリーズ「物性研究の展望」

表面・人工物質における物性科学のフロンティア

日 時 平成11年11月10日（水）～11日（木）

場 所 東京大学生産技術研究所 第1会議室

〒106-8666 港区六本木7-22-1

近年の物性物理学の発展の中で重要なものの一つに、高度に制御された人工物質や表面を舞台とする現象の研究がある。超高真空技術、各種の表面評価技術、エピタキシャル結晶成長技術、微細加工技術等の進歩により、原子レベルで制御された表面・界面、人工的周期構造を持つ超格子、ナノメートルスケールの超微細構造などさまざまな試料作製が可能となり、そこに新しい物性物理学の場が拓かれている。また、走査プローブ顕微鏡や光電子分光の著しい高度化により従来には考えられなかった空間分解能、エネルギー分解能の測定も可能となってきた。微細加工による方法とは別ルートのアプローチとして表面や界面特有の自己組織構造を利用して微細構造を作製する研究も盛んになっている。

先端領域研究部門は、物性科学の先端的研究領域について10年前後のプロジェクトを設定して先導的研究を推進する部門という性格を持つ。中期レンジの研究方向として上述のような人工物質系および表面界面を対象とする研究分野を設定し、現在6研究室（家・小森・河野・勝本・吉信・長谷川）がこれらに取り組んでいる。現時点でのプロジェクトとして、人工超格子・超微細構造などの人工物質系において展開される低温量子物性の研究、走査プローブ顕微鏡を用いた局所電子状態や伝導現象の研究、固体表面において発現する新物質相の物性に伝導や磁性の研究、固体表面における化学反応等の動的過程の原子レベルでの研究、それを利用した新物質の創製、量子液体表面における低温物理現象の研究、などが進行中である。

本研究会は、「物性研究の展望」研究会シリーズの一環として企画されたもので、2日間にわたり六本木の生産技術研究所大講義室で開催された。初日は主として表面物性関係、2日目は量子物性関係の内容のプログラムを組んだ。部門所員による研究発表のほかに、関連分野において第一線で活躍されている研究者数名にご講演をいただいた。またポスターセッションを設けて、所内外の若手研究者に研究発表をしていただいた。約150名の参加者を得て活発な議論が行われた。当部門の活動分野および関連分野におけるわが国および世界の研究状況と将来の方向を展望し、それを踏まえて柏新キャンパスにおける部門としての研究の方向および当該分野におけるわが国の研究体制の中での物性研の果たすべき役割を考える良い機会となった。

（文責： 家 泰 弘）

プログラム

11月10日（水） —— 表面物性を中心として ——

10:00-10:10	開 会	
	所長挨拶	福山 秀敏
10:10-10:40	表面研究の展望-SPMとナノ構造	塚田 捷（東大理）
10:40-11:10	水素終端シリコン表面における原子細線	橋詰 富博（日立基礎研）
11:10-11:30	—— 休憩 ——	
11:30-12:00	非線形レーザー分光を用いる表面反応ダイナミクス	堂免 一成（東工大資源研）
12:00-12:30	金属表面での多体効果を含む動的現象	笠井 秀明（阪大工）
12:30-14:00	—— 昼食 ——	
14:00-14:30	表面ナノ構造ネットワークの磁性	小森 文夫（物性研）
14:30-15:00	STM によるナノ領域での電子状態・電気伝導	長谷川幸雄（物性研）
15:00-15:30	半導体表面=有機分子ハイブリッド系の構築と物性	吉信 淳（物性研）
15:30-17:00	*** ポスターセッションA ***	
17:00-17:30	In/Cu(001) 系におけるFermi面不安定性	有賀 哲也（京大理）
17:30-18:00	電子材料を目指した表面人工新物質の電子物性	大門 寛（奈良先端大）
18:30-20:00	—— 懇親会 ——	

11月11日（木） —— 量子輸送を中心として ——

9:30-10:00	半導体人工原子のスピン効果	樽茶 清悟（東大理）
10:00-10:30	強磁場中量子ドットの遠赤外応答	小宮山 進（東大総文）
10:30-10:50	—— 休憩 ——	
10:50-11:20	Fractional Charge in Quantum Transport through a Quantum Wire	永長 直人（東大工）
11:20-11:50	Sheets of Ions Trapped below the Surface of Superfluid Helium: a Model System for the Study of Two - Dimensional Matter	W. F. Vinen (Professor Emeritus, Univ. of Birmingham)
11:50-13:20	—— 昼食 ——	
13:20-15:00	*** ポスターセッションB ***	
15:00-15:30	ヘリウム液面に実現する変った低次元系	河野 公俊（物性研）

15:30-16:00	単電子トンネルとメゾスコピック物理	勝本 信吾 (物性研)
16:00-16:30	超周期構造中の2次元電子系	家 泰弘 (物性研)
16:30-16:50	—— 休憩 ——	
16:50-17:20	単一クーパー対箱における量子コヒーレンス	中村 泰信 (NEC基礎研)
17:20-17:50	強磁性体単一電子トランジスタの磁気抵抗	大塚 洋一 (筑波大物理)
17:50	閉 会	

ポスターセッションA

11月10日 (水) 15:30~17:00

- (A 1) 第一原理電子状態計算による銅表面上でのメタノール合成反応の研究
JRCAT-融合研¹, JRCAT-ATP² 森川 良忠¹, 岩田 圭司², 寺倉 清之¹
- (A 2) アルミナ表面における水素分子のオルソ・パラ変換とオルソ・パラ分離
東大生研 馬込 保, 福谷 克之, 岡野 達雄
- (A 3) Pt(111)表面上のNOの吸着構造
東大生研¹, 東大物性研² 松本 益明¹, 福谷 克之¹, 岡野 達雄¹,
常行 真司²
- (A 4) HREELSによるIn/Si(111)-(4×1)表面の研究
東北大理 坂本 一之, 芦間 英典, 須藤 彰三,
内田和喜男
- (A 5) Cu(111)の時間分解二光子光電子スペクトルに対する電子間クーロン相互作用の効果
阪大工¹, 和歌山高専² 坂上 護¹, 笠井 秀明¹, 興地 斐男²
- (A 6) STMにより誘起されるCu(100)上のアセチレンの回転機構—その微視的理論
阪大工¹, 和歌山高専² 長谷川和彦¹, 笠井 秀明¹, Wilson A. Diño¹,
興地 斐男²
- (A 7) 電子-イオン・コインシデンス分光法による光刺激イオン脱離反応: PMMA薄膜
広島大理¹, 物構研², 千葉大工³ 関谷 徹司¹, 池永 英司¹, 藤井健太郎¹,
安井 良水¹, サーダーサイダルアミン¹,
和田 真一¹, 間瀬 一彦², 上野 信雄³,
田中健一郎¹

- (A 8) Si(111),(001)面の2光子光電子分光
横浜国大¹, 千葉大², 理研³ 首藤 健一¹, 武田 新也², 宗像 利明³
- (A 9) Ni(100)表面に誘起された一次元鎖構造
理 研 米田 忠弘, 川合 真紀
- (A10) イオン性分子結晶表面の特異な安定化機構と相転移
筑波大物工 石田 真彦, 重川 秀実
- (A11) GaP ($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$) 超構造表面のSTM観察
奈良先端大¹, 物性研² 服部 賢¹, 石原健太郎¹, 大門 寛¹,
小森 文夫²
- (A12) STM誘起連鎖反応による重合分子鎖の生成
理研¹, 阪大工² 大川 祐司¹, 青野 正和^{1, 2}
- (A13) ELSLEED法による表面電子バンド中のプラズモンの分散測定
東大理 長尾 忠昭, 長谷川修司
- (A14) Si(100)2×1表面上における1,4-シクロヘキサジエンの吸着状態
東大物性研 山下 良之, 浜口 香苗, 町田 真一,
向井 孝三, 吉信 淳
- (A15) Si(100)2×1面上における1,4-シクロヘキサジエンの電子状態の観測
東大物性研 浜口 香苗, 山下 良之, 町田 真一,
向井 孝三, 吉信 淳
- (A16) 窒素吸着Cu(001)表面におけるコバルトと鉄島構造の成長
東大物性研¹, CREST² 大野 真也¹, 向井 孝三¹, 中辻 寛¹,
小森 文夫^{1, 2}

ポスターセッションB

11月11日(木) 13:20~15:00

- (B 1) ABリング磁気抵抗振動に及ぼすスピン軌道相互作用の影響
NTT物性科学基礎研究所 新田 淳作, J.W. Berghuis, F. E. Meijer,
高柳 英明
- (B 2) Si-MOS FETのエッジチャンネル
阪大理 音 賢一, 新井宏一郎, 松林 知也,
鷹岡 貞夫, 邑瀬 和生
- (B 3) アンダーソン転移点での境界条件に依存したコンダクタンスの分布
上智大理工¹, 阪大理², 東邦大理³ 大槻 東巳¹, Keith Slevin², 河原林 透³

- (B 4) 微小Hubbard鎖の輸送係数
大阪市大理 小栗 章
- (B 5) Co/Alトンネル接合細線におけるスピン注入とホール効果
東北大工 大谷 義近, 石山 智一, 深道 和明
- (B 6) STM/STS Investigation of Spin Dependent Tunneling with Coulomb Blockade
in Insulating Granular Films
東北大金研¹, 東大物性研² 高梨 弘毅^{1, 2}, 千葉 淳¹, 三谷 誠司¹,
勝本 信吾², 藤森 啓安¹
- (B 7) 鉄ナノワイヤーの量子化コンダクタンス
東大物性研¹, CREST² 中辻 寛¹, 小森 文夫^{1, 2}
- (B 8) 液体ヘリウム表面における原子状水素と2次元電子の反応
東大物性研 新井 敏一, 椎野 俊之, 河野 公俊
- (B 9) Surface smoothness of liquid 3He at ultra - low temperatures
東大物性研 Oleg Kirichek, 斎藤 政通, 河野 公俊
- (B10) Vortex State in Microfabricated Superconducting Disk Probed by Tunneling
Spectroscopy
東大物性研¹, CREST² Maxim Zalalutdinov², 藤岡 博幸¹,
橋本 義昭¹, 勝本 信吾^{1, 2}, 家 泰弘^{1, 2}
- (B11) 超伝導SETトランジスタの特性と量子ホール効果状態測定への応用
東大物性研¹, CREST² 藤岡 博幸¹, 遠藤 彰¹, 勝本 信吾^{1, 2},
家 泰弘^{1, 2}
- (B12) 多層量子ホール系の非線形電気伝導
東大物性研¹, CREST² 川村 稔¹, 遠藤 彰¹, 勝本 信吾^{1, 2},
家 泰弘^{1, 2}
- (B13) Electron Transport in a Two-Dimensional Electron Gas at GaAs/AlGaAs
Heterointerface under a Spatially Modulated Magnetic Field
東大物性研¹, CREST² 加藤真由美¹, 遠藤 彰¹, 勝本 信吾^{1, 2},
家 泰弘^{1, 2}
- (B14) ランダム磁場中の2次元電子系
東大物性研¹, CREST² 安藤 正人¹, 遠藤 彰¹, 勝本 信吾^{1, 2},
家 泰弘^{1, 2}
- (B15) チェッカーボード磁場中の超伝導ネットワーク
東大物性研¹, CREST² 伊藤 優¹, 安藤 正人¹, 勝本 信吾^{1, 2},
家 泰弘^{1, 2}

あいさつ

福山 秀敏

2000年4月より物性研究所は東京大学第三極柏新キャンパスで物性研究の新しい研究・教育活動を展開します。この活動では是非世界のCOEを目指したいと思います。そのためには所員各自が自らの特徴を十分生かし所内外の方々との切磋琢磨を通じて先鋭的な研究を遂行しその成果を世界に発信することが必要です。同時に、物性研究所は全国共同利用研究所として、我が国の物性研究活動の中での役割を十分認識し、それに対して責任を果たすことが求められております。このような認識に基づいて、物性物理各分野における研究の現状を見極め、その中で将来物性研究所が展開すべき研究の方向を見定めるための、率直且つ徹底した討論の機会が必要であると考え、この研究会シリーズ「物性研究の展望」を計画しました。

今回の「先端領域研究部門」の研究会は、平成11年9月及び10月に開かれた「極限環境物性研究部門」、「先端分光研究部門」に続いてこのシリーズの第3回目として平成11年11月に六本木キャンパスで開催されました。この「物性研究の展望」研究会は、基本的には各研究部門・施設単位で計画され、そのスタイルは通常物性研短期研究会と同様で総説的な講演やトピックスが紹介されます。この際、実験と理論の融合には特段の注意を払うこと、又討議されるテーマの選択に際して、伝統的・堅固な「物性物理」はもとより、その境界を広げ、「物質科学」を視野に入れるような努力をすることにしました。それに加えて、この研究会シリーズの特徴は、部門に所属する所員が自己の研究のハイライトとこれからの展望を発表し、皆様からご意見を頂くことにしました。つまり、通常短期研究会にpeer review的な要素を取り込みました。そのため、各研究会には数名の所外の先生方に評価委員として加わって頂き、印象・ご意見を「講評」と言う形で文書にまとめていただくことにしました。その「講評」は、内容はもとより形式・長さも全くと自由にして頂き、その都度「物性研だより」に掲載させて頂くことにしました。(将来、部門・施設についての全ての報告を1冊の冊子にまとめる予定です。)

評価委員の先生方にはご多忙のところまことに申し訳なく思っておりますが、今回も「講評」をご快諾下さり心より感謝しております。頂いた「講評」は各研究部門・施設さらには所全体で十分検討させていただき、研究所の将来の発展のために役に立たせていただきたいと思います。

東大院理 塚田 捷

前半では表面研究の現状を概観し、これからの方向を展望した。後半では走査プローブ顕微鏡の理論的な基礎、および関連するナノ構造の物理について、最近のトピックスを紹介した。

精密科学としての表面科学の出発は1970年代になってようやく始まったというのが、一般的な見方であろう。すなわち、再現性のあるよく制御された表面は超高真空中でなければ形成されず維持できないので、表面の実験には超高真空装置が欠かせない。このような超高実験装置の普及は1970年ころに実現し、表面科学推進のための基礎的な条件が形成された。同時に表面を探る各種の実験法が開発されるのもこのころである。例えばイオン散乱分光、光電子分光 (UPS, XPS), 特に軌道放射光を用いた角度分解光電子分光, EXAFS などといった諸技術の開発も続いた。低速電子線回折, 反射高速電子回折, オージェ分光, などといった電子をプローブとした標準的な表面分析法の歴史はもっと古いが, 1970年代ではそれらの格段の精密化が実現する。一方, 表面研究にとって現在重要な役割を果たすようになっている密度汎関数法による第一原理計算も, 実用化に向けての努力がスタートする。

1970年代の後半から80年代にかけてはこれらの実験・理論の両面からの研究の対象は, 半導体表面を中心とした比較的簡単な再構成構造の解明に向けられた。また吸着機構や表面動力学の研究も着実な進歩があったが, 現在の時点で振り返れば大きなブレークスルーを模索する時代であったように思われる。そして, この意味で表面研究に画期的な前進をもたらしたのは, 1982年における走査トンネル顕微鏡の発明である。この実験法の衝撃と波及効果はきわめて大きなものがあつた。すなわち, 表面構造と電子状態との情報を原子尺度分解能で実空間で得ることが可能となった。走査トンネル顕微鏡はさらに走査トンネル分光, 原子間力顕微鏡, 近接場光学顕微鏡など, 走査プローブ顕微鏡法と呼ばれる様々な関連手法の開発へと発展した。このような実験手法の開発は, 表面研究の対象を一挙に拡大し, 格子の周期性より大きいナノスケールで特徴をもつ構造の研究へと前進させることになった。また, プローブ探針による表面構造の制御, 表面反応の誘導など人工的なナノ構造生成とその機能開発という研究領域が誕生することになる。これは表面科学のパラダイムの誕生が, 画期的な研究手法の導入によってもたらされた典型的な例と言えよう。伝統的な表面研究分野も, 上に述べた走査プローブ顕微鏡や第3世代軌道放射光などの実験手段, 第一原理計算などを中心とした計算物理の進歩にともなって, 現在, 研究対象を格段に拡張深化し質的な転換を遂げようとしている。

後半では最近の新しい表面物理の研究動向を反映するものとして, 筆者のグループで取り組んでいる研究内容からトピックスを紹介しつつ, 将来展望を行った。例えば走査トンネル顕微鏡の分解能の起源を, 探針の効果と関連させた理論シミュレーションに基づき説明した。またこれと対比

して非接型原子間力顕微鏡がどのような物理量を画像化しているのか、なぜ原子尺度で分解能が可能かを考察し、表面上の原子の同定に期待がもてることを述べた。ナノスケール系の力学的性質に関する研究の発展性を強調した。さらに原子架橋および分子架橋構造で予測される興味深い量子伝導の特徴を議論した。

水素終端シリコン表面における原子細線

日立基礎研	橋 詰 富 博
	平 家 誠 嗣
	藤 森 正 成
	諏 訪 雄 二
	市 村 雅 彦
	小野木 敏 之
東大工学部	一 杉 太 郎
	松 浦 志のぶ
東北大金研	渡 邊 聡
	Z. Q. Li
	大 野 かおる
	川 添 良 幸

半導体技術の急速な進歩により、ナノメートルスケールの極微細デバイスの開発が試みられるようになり、表面科学の分野でも、原子スケールの物理が大きな関心を集めている。もう一つの背景として、走査トンネル顕微鏡 (STM) 技術の発展により原子を自在に操ること (原子操作) が可能となり、人工原子構造の物性を評価する研究が進展している。本講演では、STMを用いた水素終端 Si(100)2×1 表面の原子スケール構造の観察と、第一原理計算の結果により明らかになった、水素終端シリコン表面における原子構造の特性を紹介する。

実験は超高真空STMを用い、室温および低温 (30K~150K) で測定を行った。P ドープした Si(100) (7~18mΩcm) を試料基板とし、探針はタングステン単結晶を電解研磨したものを用いた。水素終端 Si(100)2×1 表面において、観察時より大きなトンネル電流とバイアス電圧を印加しながらSTM探針を移動させ、水素原子を引き抜いてダングリングボンド (DB) 構造を作製した。

非対DB (Siダイマーから水素が一つ抜けた構造) が数個並んだ構造を作製してSTMにより構造緩和を観察した (図1) [1]。第一原理計算の結果、第2層目のSi原子の位置が緩和してSi原子ペアを構成することにより、DBを持つ第1層のSi原子に凹凸が生じて、電荷の移動と構造緩和、すなわち、ヤーンテラー効果が生じていると理解できた。また、低温において水素終端 Si(100)2×1 表面へのGa原子吸着の様子をSTM観察した結果、Ga原子が一次的に拡散していると考えられ

る棒状の構造 (Ga Bar) を見いだした (図2) [2]。水素終端表面上のGa原子に対する吸着ポテンシャルエネルギー面を第一原理計算より得、STMで観察された結果を良く説明できた。両端のダイハイドライドが井戸型ポテンシャルの壁となっていることがSTM像からわかり (図2b), 第一原理計算でも確認できた。

[参考文献]

- [1] T. Hitosugi, S. Heike, T. Onogi, T. Hashizume, S. Watanabe, Z. - Q. Li, K. Ohno, Y. Kawazoe, T. Hasegawa, and K. Kitazawa, Phys. Rev. Lett. **82**, 4034 - 4037 (1999).
- [2] T. Hitosugi, Y. Suwa, S. Matsuura, S. Heike, T. Onogi, S. Watanabe, T. Hasegawa, K. Kitazawa and T. Hashizume, Phys. Rev. Lett. (Nov. 22 issue, 1999) in press.

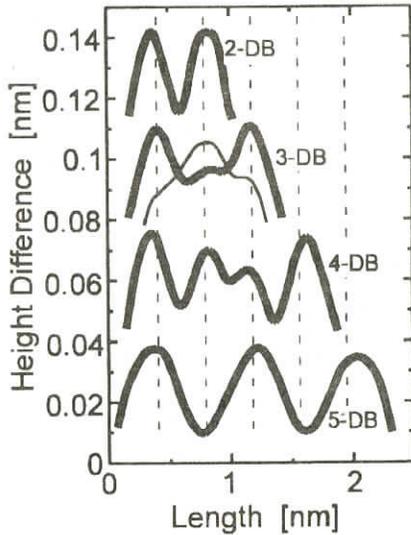


図1. 非対DBを2個から5個並べた構造のSTM像の断面

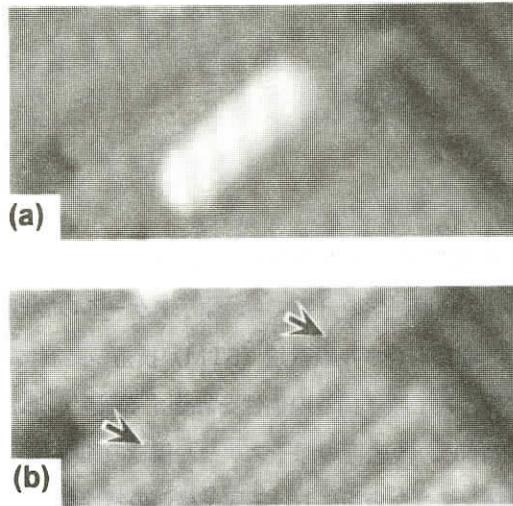


図2. (a)は水素終端シリコン表面におけるGaBar構造のSTM像
(b)はGa原子を取り除いた後の表面構造

非線形レーザー分光を用いる表面反応ダイナミクス

東京工業大学資源化研究所 堂 免 一 成

ピコ秒波長可変赤外レーザーは固体表面に吸着した分子の振動スペクトルをピコ秒の時間分解能で得ることができるもので、得られた分子の構造から化学反応の中間状態の情報が得られる。赤外パルスレーザーを用いる実験では、単結晶表面に吸着した分子に対しては界面和周波発生(SFG)法によって、また粉体表面に吸着した分子に対しては赤外吸収法によって振動スペクトルを測定することで単分子層以下の吸着量の表面分子の構造を同定することができる。本講演では赤外パルスレーザーを応用して行った研究の中から、酸化ニッケル表面上のホルメート種の近赤外パルス照射下の過渡変化について議論を進める。

近赤外領域のポンプパルスを試料表面に照射すると、表面が熱的に励起され、それにともなった吸着分子の構造の変化をSFG法によって観察することができる。短い時間幅のパルス光の照射では表面分子の脱離や分解は抑制され、不安定な状態に留まっている分子を検出することができる。固体表面に吸着したホルメートは様々な不均一触媒反応の中間体としてみられるもので、その反応ダイナミクスは非常に興味深い。

Ni(111)基板上に形成したNiO(111)薄膜に吸着したホルメートは2個の酸素原子によってニッケルカチオンに配位しているバイデンテート型である。Fig. 1aに示すように400Kで 10^{-5} PaのDCOODの存在下では 2160cm^{-1} にバイデンテート型ホルメートのC-D伸縮振動のピークが観測された。表面に波長1064nm、時間幅35 ps、パルスエネルギー10mJのポンプ光を照射するとFig. 1bのように新たに 2190cm^{-1} にピークが現れ、照射から100 ps後では消滅している(Fig. 1c)。新しいピークは1個の酸素原子で表面に吸着しているモノデンテート型ホルメートによるものである。可視光をs偏光とした測定ではモノデンテート型ホルメートのピークが強く観察されていることからモノデンテート型ホルメートのC-D軸は表面法線より傾いていることが分かった。パルス照射による短時間の昇温によって、バイデンテート型ホルメートを殆ど分解することなくモノデンテート状態に励起されている。このモノデンテート型構造はホルメートの分解などの反応の際に経由している中間状態である可能性が高い。

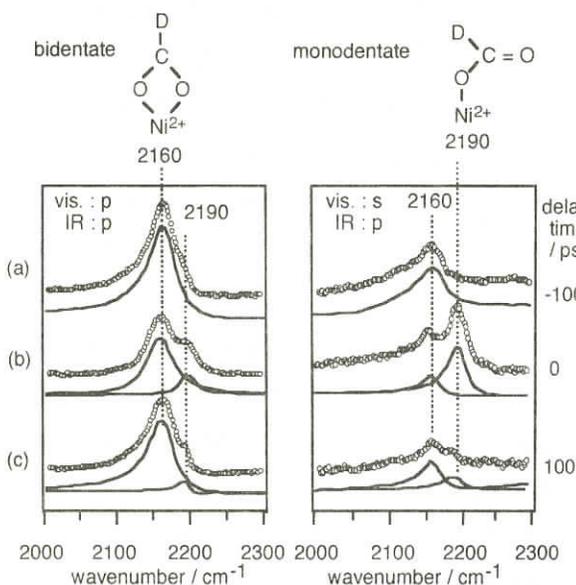


Fig. 1 SFG spectra of formate on NiO(111) at 400 K under the irradiation of 1064 nm laser pulses at various delay time

1. はじめに

金属表面に磁性原子を吸着させ、走査トンネル顕微鏡(STM)を用いて、近藤効果を実空間で観察する。このような試みが表面物性学の分野で始まっている。ここでは、金属表面での多体効果を含む動的現象として、この近藤効果の実空間観察と金属表面で運動する磁性原子に働く摩擦の近藤効果について考える。

2. 近藤効果の実空間像

微量の磁性原子(Fe原子など)を含む希薄磁性合金で、1930年代に実験的に見出された電気抵抗極小の現象は、約30年を経て、近藤淳の論文によって理論的に説明された。その後の近藤効果に関する研究の発展には目覚ましいものがあり、顕著な成果が得られている。

この近藤効果を観察するために、金属表面に磁性原子を吸着させ、磁性原子の近傍でトンネル電流を測定する。1993年にCrommieらが、STMを用いて、このような実験を始めた。その結果、Cu(111)に吸着しているFe原子のSTM像には、Fe原子近傍に鋭いピークとFe原子を中心とする同心円状の定在波が見えている。

さらに、微分コンダクタンスのバイアス電圧依存性の測定から、磁性原子近傍の電子状態の分光学的情報も得られ始めた。例えば、Ag(111)に吸着しているCe原子やAu(111)に吸着しているCo原子の測定結果には、近藤温度程度のエネルギー幅を持つ窪み構造が見えている。

ここでは、アンダーソン模型を用いて電子状態密度の実空間分布を調べ、STM像に現われるピーク構造(近藤ピーク、芳田ピーク)が微分コンダクタンスのバイアス電圧依存性に現われる窪み構造に対応していることを指摘したい。

3. 金属表面で磁性原子に働く摩擦の近藤効果

次に、金属表面で磁性原子のダイナミクスを考える。ダイナミクスを決定づける要因には、電子系のエネルギーで与えられるポテンシャル・エネルギー曲面の形状があるが、さらに表面の格子系や電子系へのエネルギー散逸も考えられる。

ここでは、電子系へのエネルギー散逸によって摩擦力が働く場合には、摩擦係数の温度依存性、外部磁場依存性に顕著な近藤効果が現われることを指摘したい。

4. おわりに

金属表面での多体効果を含む動的現象として、ここでは、近藤効果の絡む現象をとりあげた。多体効果を実空間で直接観察することは、バルク中では、ほとんど不可能と思われるが、表面での電子や原子核のダイナミクスの観察を通して、可能になる。「表面・界面のナノ物性とダイナミクス」という研究領域が益々深みと広がりを増し、非常にアクティブになっている。

表面ナノ構造ネットワークの磁性

東大物性研 小森 文夫

表面に形成できる新奇な系として2原子層（ML）程度の高さのCo微粒子配列に注目し、その構造と磁性を調べている。

飽和吸着量より少ない窒素が吸着したCu(001)表面では、1辺が5nmの正方形の窒素が吸着した領域が狭い清浄な銅表面によって分割され、銅の露出した部分が格子状の構造を持つ[1]。この

N-Cu(001)表面上にCoを蒸着させると、Coは格子点に選択的に吸着し、直径が3~4nm、厚さが2MLのCo微粒子が図1のように成長する。我々は超高真空中でSTMを用いてこのCo微粒子配列の構造を、磁気Kerr効果を用いてその磁性を調べている。温度95Kで(110)方向のヒステリシス曲線のCo平均膜厚依存性を調べると、平均膜厚1.3MLから強磁性が現れ、飽和磁化や保磁力は膜厚とともに増大していることがわかった。この平均膜厚1.3MLの試料では、強磁性転移温度は約150Kであり、それ以上の温度では超常磁性に特徴的な磁化曲線が観測されている。観測した(110)方向磁気ヒステリシス曲線では、飽和磁化が残留磁化よりも常に大きくなっている。また、平均膜厚1.8-2.1MLの試料では、転移温度は室温以上であるが、磁化は温度の低下とともに一度飽和し、150K以下で再び増大した。図2はN-Cu(001)表面上のCoドットと清浄なCu(001)表面上のCo薄膜の膜厚依存性に対するキュリー温度の変化である。清浄なCu(001)表面上に形成された薄膜に比べて、キュリー温度が常に高くなっていることが分かる。このことはN-Cu(001)表

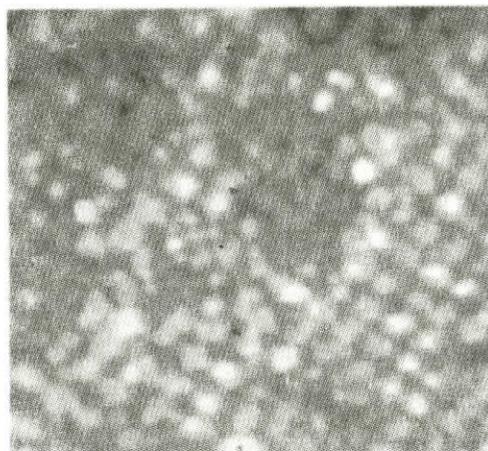


図1 窒素吸着銅(001)表面に形成されたコバルト微粒子列のSTM像

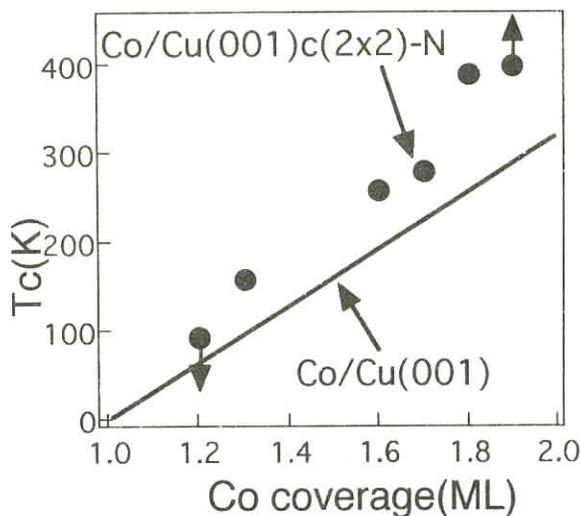


図2 窒素吸着銅(001)表面に形成されたコバルト微粒子列の強磁性転移温度と平均膜厚の関係。実線は清浄な銅(001)面上のコバルト薄膜の転移温度である。

面上では2 MLのCoが微粒子配列として成長しているために、強磁性が銅清浄表面上のコバルトより高い温度で発現していることを示している。転移温度と平均膜厚との関係や低温での磁化の上昇などの実験結果を説明するために、超強磁性Coドット間の相互作用や膜厚に依存した2段階の強磁性の出現について考察した。

今後、このような表面に形成できる新奇な系の電子物性についてさらに研究を続けたい。

[1] F. M. Leibsle et al. Phys. Rev. B 47, (1993), 15865

STMによるナノ領域での電子状態・電気伝導

東京大学物性研究所 長谷川 幸 雄

走査トンネル顕微鏡 (STM)は、原子分解能を持つ顕微鏡として知られ、表面物性のみならず、さまざまな物性研究に用いられている。表面物性の分野では、やはり表面構造決定がその機能を最大に生かす適用例であると言えるが、それ以外にも表面電子状態や電気伝導さらに最近では超伝導・磁性・光特性などに関するさまざまな物性値が原子スケール・ナノスケールの空間分解能で得ることが可能となっている。ここでは、これまで進めてきた研究について概観するとともに、これらを踏まえて物性研究所において今後新たに展開していこうとする研究の一部について紹介する。

(1) 表面2次元電子系

金・銀・銅などの貴金属やベリリウム表面では、表面に局在した電子状態が存在し2次元電子系を構成することが知られている。この電子状態は表面でのステップや欠陥構造による散乱・干渉により定在波を生成するが、STMによりこの定在波を実空間で観察することにより、その電子状態のエネルギー分散関係や位相緩和長の測定、さらには近藤効果などの影響を直接にかつ局所的に捉えることも可能となっている。

また一方、シリコンなどの半導体の表面においても、ダングリングボンドによる準位がエネルギーギャップ内に形成され、表面準位を形成する。最近のSTM等を用いた研究に依れば、この表面準位を介した電気伝導が存在することが指摘されており、ホモエピタキシーによるアイランド構造やSTMを用いた超微細加工によるナノ構造が電気伝導に与える影響が議論されている。

これまで2次元電子系に関しては、先端領域部門の他の研究室でも研究されているように、シリコン/シリコン酸化物界面・半導体ヘテロ界面や液体ヘリウム表面などが用いられている。上記の表面2次元電子系も同様に議論することが出来ると考えており、その物性に2次元性特有の現象が観察されるのではと期待している。表面2次元電子系を用いることの最大の利点は、STMあるいは原子間力顕微鏡 (AFM)を用いてその状態を局所的に直接プローブできる点である。これらの技術を駆使することによって、これまでの2次元電子系による研究と相補的なあるいは新奇な物性

の測定を進めていく計画である。

(2) 界面での電子状態—ピンニングセンターの観察

一方、STMによっても界面の状態を局所的にプローブすることは可能である。良く知られた例としては、バリスティック電子放射顕微鏡(BEEM)がある。この手法を用いることにより金属半導体界面でのショットキー障壁の分布を評価することができる。

最近、SiC等における界面でショットキー障壁の高さが金属半導体本来のフェルミ準位の位置関係だけで決定されるいわゆるピンニングフリーの界面が形成されることが報告されている。このような系では個々のピンニングセンターによるショットキー障壁の変化が、BEEMにより捕えられることが期待でき、これから個々のピンニングセンターに関する情報を直接的に得ることができると考えている。

金属半導体界面におけるショットキー障壁あるいはピンニングセンターの問題は古くから議論されているテーマであるが、最近のSTMによるステップ分布の評価などにより、ようやくピンニングセンターの制御が出来つつあり新たな展開を見せている。個々のピンニングセンターの可視化により、さらにこの流れを推進していきたいと考えている。

半導体表面=有機分子ハイブリッド系の構築と物性

東大物性研 吉 信 淳

表面科学(化学)は、素過程や構造を明らかにする段階から、蓄積された情報やノウハウを活かしてより複雑で高次元な構造を生成・制御したり、現象の時間発展や非平衡状態を解明し、新機能・新物性の発見・発現を目指す段階に入ったといえる。その方向に沿った研究の一つとして、固体表面特有の構造や異方性を積極的に利用した配向分子系の構築がある。本研究では、半導体表面=有機分子ハイブリッド系として、Si(100)(2×1)表面と環状不飽和炭化水素(シクロペンテン、シクロヘキセン、1,4-シクロヘキサジエン)との相互作用について報告した。

Si(100)(2×1)表面上にアセチレンやエチレンなどの鎖状不飽和炭化水素を吸着させると、炭化水素の π 結合とSi表面のダングリングボンドが相互作用し、 $di-\sigma$ 結合することが知られている。ベンゼンの場合は分子面を表面にはほぼ平行にしてバタフライ型で吸着していることが明らかになっている。シクロペンテンはSTMや表面赤外分光から、分子面をほぼ表面垂直にして吸着していることが報告されている。

上記3種の有機分子(シクロペンテン、シクロヘキセン、1,4-シクロヘキサジエン)をSi(100)(2×1)表面に飽和吸着させたところ、LEED像はシャープな(2×1)パターンを示した。紫外光電子分光(UPS)測定により、Si(100)(2×1)清浄表面のダングリングボンドに起因するピーク

(E_F 以下0.8eV)が飽和吸着により完全に消失することがわかった。

シクロペンテン、シクロヘキセンは π 結合を1つ有している。マルチレイヤーで観測された π 結合(=HOMO)に帰属されるピークは、化学吸着の結果消失する。このことから、シリコン表面のダングリングボンドと炭化水素の π 結合が相互作用し化学結合が形成されたと考えられる。LEEDや過去の研究結果から、分子とシリコン(2×1)ダイマーが一对一で反応し、di- σ 結合していることが予想される。

一方、1,4-シクロヘキサジエンは2個の π 結合を有している。2本とも吸着結合に関与するか、1本だけなのか興味深い。高分解能電子エネルギー損失分光(HREELS)の測定から、分子状態で表面に吸着していることを明らかにした。飽和吸着後、LEED像は(2×1)構造を示し、UPSではダングリングボンドに因るピークが完全に消失する。マルチレイヤーで観測される π 結合に起因する2本のピークは化学吸着により消失し、新たに1本のピークが E_F 以下3.8eVに観測される。これらのことから、2本の π 結合のうち1本とシリコン(2×1)ダイマーが相互作用し吸着していると考えられる。新たに生じたピークは反応に関与しなかった残りの分子内 π 結合によるものと考えられる。このピークに対し光電子分光の選択則を適用し、吸着分子がSi(100)(2×1)表面に対して異方性をもって配列していること、分子面がほぼ垂直であることが明らかになった。このことは、走査型トンネル顕微鏡(STM)による観察結果からも支持される。

1,4-シクロヘキサジエン/Si(100)などを出発物質として、さらに反応を組み合わせ新しい分子系を構築することや、分子デバイスの基礎となる分子架橋構造への応用などについて展望した。

In/Cu(100)系におけるFermi面不安定性

京都大学大学院理学研究科化学専攻 有賀 哲也

我々は、低次元系としての面白い性を示す表面物質の探索を進めている。純粋な2次元系ではなく、「3次元系に張り付けられた2次元系」としての表面の特徴があらわれる現象が見つければ面白いと考えている。本講演では、この物質探索の過程で取り上げたIn/Cu(100)系について、現時点であきらかになっていること——即ち、Cu(100)表面に吸着した1~2原子層厚のIn層が、表面共鳴バンドが形成するFermi面のネスティングにより、原子位置の組み替えを伴う構造相転移や、周期的原子変位と結合した電荷密度波相転移を起こすということ——を報告した。以下にその概要を述べる。

室温でCu(100)上にInを吸着させると、被覆率1.0付近で歪んだ $p(2\times 2)$ 平均単位格子を持つ相、被覆率1.5付近で $c(4\times 4)$ 相、被覆率2.0付近で $p(2\times 2) + (\sqrt{10}\times\sqrt{10})$ 共存相が、低速電子回折により観測される。

被覆率1.0の歪んだ $p(2 \times 2)$ 相は350Kで $c(2 \times 2)$ へと可逆的に転移する。走査トンネル顕微鏡 (STM)によると、高温の $c(2 \times 2)$ 構造は、0.5 MLの $c(2 \times 2)$ -In層が2層重なった構造である。これに対し、低温の歪んだ $p(2 \times 2)$ 相では、[010]方位に帯状にのびた $c(2 \times 2)$ 領域が平行に並んでいる。隣接する $c(2 \times 2)$ 領域は反位相の関係にあり、帯と帯の間には非 $c(2 \times 2)$ 構造の中間領域が形成される。この構造は、 $c(2 \times 2)$ 構造に対して[001]方位に9倍周期の格子変調(Q)が加えられたものと見ることができる。角度分解光電子分光 (ARPES)により、高温 $c(2 \times 2)$ 層では、In-Cu結合に由来する表面共鳴バンドが観測された。この表面共鳴バンドは、表面に射影したCuのバンドの中にあるので、純粋な2次元状態ではない。この表面共鳴バンドは、Fermi準位を横切る——即ち2次元Fermi面(のようなもの)を形成する。ARPESにより決定した高温 $c(2 \times 2)$ 相の2次元Fermi面はほぼ正方形であり、そのFermi波数ベクトルと低温相の格子変調ベクトルは整約関係、 $Q=(2/3)kF$ 、を満たしている。さらに、Inに由来する表面共鳴バンドが、相転移に伴って、 $c(2 \times 2)$ の表面Brillouinゾーンの境界付近でエネルギー・ギャップを生じることを確認した。これらのことから、この相転移は、Fermi面のネスティングによるものであると結論した。

さらに、被覆率1.5、2.0付近での長周期構造についてSTM観測を行ったところ、 $c(2 \times 2)$ あるいは $p(2 \times 2)$ の基本原子配列に長周期の電子密度の濃淡が重畳していることが分かった。これは、3次元の金属的電子系を有するIn/Cu(100)のうち、最表面層のみに生じた電荷密度波に由来するものであると考えている。

現在、走査トンネル分光や角度分解光電子分光の測定を進めるとともに、より低温で新しい相が現れないか検討している。

電子材料を目指した表面人工新物質の電子物性

奈良先端科学技術大学院大学物質創成科学研究科 大 門 寛

現在の表面研究は数原子層を対象としており、 μm の大きさを持つ現実のデバイスとは無縁の世界であった。しかしながら、LSIの加工寸法が小さくなってきているので、表面が主役となって活躍できる日もそう遠くないように思われる。実際に、10数nmの素子は既に試験的には動いている。表面電子状態の存在する深さが1nmとすると、10nmサイズの素子では、表面電子状態が素子の電子状態に寄与する割合は単純に計算して60%となる。これまでは表面の影響が小さくなるように処理してきたと思われるが、数年後には表面電子状態を積極的に利用しないと素子がうまく機能しなくなると思われる。

産業界で考えられている電子素子の利用の大きな分野は、演算と記憶・再生の機能である。それらに利用できる表面物性は、巨大磁気抵抗、表面垂直磁化、光誘起相転移、2Dガス、クーロンブ

ロケード、誘電分極、種々の相転移などがある。また、その他にもSAW、超伝導、量子ホール効果などが利用されている。しかしながら、新しい現象が発見されても、これらが工業的に役立つためには、出力の大きさ、安定性、高速性、微細性、信頼性、歩留まり、コスト、などの厳しい条件が必要である。また、これからは、環境、エネルギー、安全、人間工学などを考慮するという社会的要請が有ることを認識しなければならない。また、特許になる高付加価値の材料・プロセス技術が求められているので、独創性の高い研究が必要なのは言うまでもない。

上記のような物質開発の指針を念頭において、表面物性の現状と将来を考えてみる。表面物性の対象として現在さかんに研究されている表面数層の新物質群（例えば、電気伝導度が高いSi(111)表面上の $\sqrt{21}$ -Ag超格子構造など）はそのままでは利用が考えられない。これらの新物質群は、現在超高真空中でしか研究されておらず、空気中に出すと汚れてしまい、性質が失われてしまうと心配される。しかし、実際にそこまで研究した人がいるわけではなく、研究がそこまで進んでいないというのが実状である。

表面物質は、その電子構造が2次元的で、光電子分光によって電子状態、特にフェルミ面の様子が明確にわかるという特徴が有り、電子状態からの議論がしやすい。また、3次元的には不安定な物質でも、表面には任意に積層して創成する事ができるため、表面は新物質探索の宝庫である。レーザービームアブレーションやSTM加工など新しい作成法も開発されているので、種々の新しい表面新物質を作成し、その物性を測定することにより、2次元物質特有の機能を見つけるような研究が望まれる。我々の研究室では、2次元表示型分析器やSTMなどを用いて電子構造や原子構造を確認しながらこのような研究を推進している。

最後に、色々議論していただいた奈良先端科学技術大学院大学物質創成科学研究科微細素子科学講座の浦岡行治助教授に感謝します。

半導体人工原子のスピンの効果

東大理 樽茶清悟

量子細線、量子ドットなどの電子状態を調べることによって、電子の低次元性や電子相関の効果が分かるようになってきた。電子状態は量子力学的な閉込めとクーロンの相互作用で決められる。そのなかで、スピンは電子の多体性を敏感に反映する量子数であるが、その実験的な研究はほとんど進んでいない。これは、多くの場合、関与する電子状態を正確に求めることが難しいためである。しかし、最近では、対称性の高い閉込めポテンシャルをもつ量子ドットを作ることによって、少数多体系の電子状態を検出あるいは制御することができるようになった。ここでは、そのような量子ドット（人工原子）を用いて観測される少数電子系のスピン状態について述べる。

電子の波長に比べて十分薄い円盤状の人工原子では、面内閉込めの回転対称性を反映して、電子軌道の固有状態は良い量子数（動径方向の量子数と軌道角運動量）で記述される。このような構造は半導体の微細加工を利用して作られ、ドットにゲート電圧や磁場を印可することによって、電子の個数や量子状態を厳密に制御することができる。その結果、本物の原子に類似の性質（殻構造とフント則）をもつ電子状態を実現できることが知られている[1]。このような人工原子において、量子力学的閉込めによるエネルギー（単一粒子エネルギー）が縮退するような場合を考えよう。縮退状態を占有する電子系は電子間の相互作用に強く影響される。最も単純な場合として、エネルギー縮退した二つの異なる軌道を占有する二個の電子を考えよう。この縮退はスピンを含めると四重であり、二電子系の基底状態は相互作用エネルギーを最低にするように決められる。その結果、クーロンの直接項に起因して二つの電子は異なる軌道を、交換項のために平行スピン、即ち三重項状態を占めることが予想される。実験では、磁場の関数として上記のような軌道縮退を作りだし、そのスピン状態を決定するとともに、関与する軌道とクーロン相互作用（直接項と交換項）を調べた。これにより、軌道縮退の近傍には、常に一重項-三重項遷移が見られ、三重項に対しては、電子数が少ない時には交換項が、多くなると直接項が主な寄与をすることが分かった。

さらに、上記のような縮退に関連する現象として、ドットが外部のリードと強く結合している場合には、ドットの二電子状態とリードの電子の一重項結合による近藤効果が現れることを見出した。

ここでは、スピン状態の最も単純な場合の一つとして、二電子系で、しかも比較的弱磁場で現れる現象に着目した。この他にも、強磁場中での分数電荷状態やウィグナー結晶化、異方的なドットで現れるスピン密度波など、理論的にはある程度予測されているものの、実験的な検証がなされていない現象多い。これらは、いずれも強い電子相関に支配される興味深いものであり、今後の実験的な研究の進展が期待される。

[1] Tarucha et al. Phys. Rev. Lett. **77**, 3613 (1996).

強磁場中量子ドットの遠赤外応答

東大総合文化 小宮山 進

半導体量子ドットを単一電子トランジスター (SET) として動作させることより量子化した電子準位を調べる事ができ、量子ドット (人工原子) の精密なスペクトロスコープに利用される。一方で、外部から電磁波を照射して量子ドット内部で電子準位間の遷移を起こしてやると SET の動作が変化する筈である。この事は逆に、量子ドットが電磁波に対して極めて高い感度を持つ検出器として働くことを意味する。実際、我々はサブミリ波帯 (現在の所波長 0.17mm から 0.21mm) での単一光子の検出が行える事を示した。半導体 (GaAs/AlGaAs) 量子ドットに数テスラの磁場を印加して、(軌道量子数の) 異なる二つのランダウ準位を生成すると、ドットの閉じ込めポテンシャルのために上位のランダウ準位と下位のランダウ準位の電子は、(フェルミ準位において) それぞれドット中心の小さな円盤状の領域 (芯) と外側の円周状の領域 (リング) に空間的に分離して存在することになる。この内部構造のため、ドットを電磁波に結合してドット内部でサイクロトロン共鳴を起こすと、励起された電子 (-e) がドット中心の芯領域に、正孔 (+e) が外側のリング領域に生成する。その同心円状の分離のため、単一光子の吸収によって SET が導通状態から遮断状態に (またはその逆に) 遷移し、それを電流で直接検知できるのである。その際、二つのランダウ準位 (芯とリング) が空間的に隔たっているために、芯に励起された余分の電子が容易に再結合せず、極めて長時間 (最高 20 分を観測) そこに保持されることが重要である。

このように、電磁波検出器として見た場合、1 個の光子吸収によって生成した励起電子が検出器中に止まって長時間電流を制御し続ける (単一光子によって 106 から 1012 個の電子の流れが制御される) 事が重要である。従来のあるゆる遠赤外・サブミリ波検出器の機構では (SET における photon assisted tunneling も含めて)、光子一つに対して高々数個の電子による電流しか生じないため単一光子検出の感度を得ることは不可能に近い。事実、ここで実測した検出感度は NEP (Noise Equivalent Power) で比べて従来の最高感度の検出器に比し 1 万倍以上の値を持つ。遠赤外・サブミリ波帯域は、固体の格子振動、半導体の不純物準位およびガス分子の振動・回転準位に対応するため、固体物理・分子分光・電波天文学等の広い分野で重要なスペクトル領域をなす。特に、半導体量子構造では人工的に生成される電子準位の多くがこの領域に対応するためその研究は極めて重要である。従って、この領域の単一光子検出器は今後種々の応用が考えられるだろう。このような応用面とは別に、電磁波吸収の効果を SET 動作を通して調べるといふことでの手法は、量子ドットの電子状態 (励起状態を含めて) を調べる上で強力な手段になると期待される。

Fractional Charge in Quantum Transport through a Quantum Wire

Naoto Nagaosa

Department of Applied Physics, University of Tokyo

Mott insulator is essentially different from the band insulator because the former is due to the combined effect of the Umklapp process and the Coulomb interaction while the latter is solely due to the Umklapp one. Therefore it is expected that the *Mott* insulator is more fragile and is more sensitive to the external perturbations than the band insulator. To illustrate this idea, we study theoretically the quantum transport in a one-dimensional *Mott* insulator.

1D interacting electron systems can be generally described by the Tomonaga - Luttinger liquid (TLL), which is a typical non - Fermi liquid. Therefore it is expected that many exotic phenomena occur like the fractional charge and power-law singularities. However one must take into account the leads connected to the finite size 1D electron system. Then we formulate the inhomogeneous TLL with Umklapp scattering to describe the realistic experimental setups, and study the quantum transport phenomena including the temperature dependence of the linear conductance, I - V characteristics, and the shot noise. The effect of the disorder will be also discussed.

Sheets of ions trapped below the surface of superfluid helium:
a model system for the study of two - dimensional matter

W. F. Vinen

School of Physics and Astronomy, University of Birmingham, UK

A charged particle can be trapped just below the free surface of liquid helium by a combination of the electric field due to its image and an external holding field. The charged particle can be a “positive helium ion”, which is created in the helium by field ionization at a sharp tungsten tip carrying a high positive electrostatic potential; the “ion” consists of a He^+ ion surrounded by a small sphere of solid helium formed as a result of an electrostrictive increase in the pressure, and its effective mass is about 30 times the mass of a bare helium atom.

This type of surface trap can be used to create an essentially two - dimensional sheet of

ions. If the liquid helium is in the superfluid phase, and especially if the temperature is below about 200mK, the ions can move horizontally with very little friction; a small residual friction is due to the scattering of thermally excited capillary waves (rippons) on the liquid surface. The sheet can therefore be used to study a very simple form of two - dimensional matter, existing in a virtual vacuum, the small magnitude of the friction allowing us to include the study of dynamical properties.

In some respects the system is similar to the two - dimensional electron system that can be trapped above the liquid surface, and which is described at this meeting by Kono. But important differences exist, connected, for example, with the fact that the surface ripples interact much less strongly with the ions than with the electrons.

Experimental study of the ion system has included much two-dimensional plasma physics, and it has contributed to the discovery of new types of edge magneto - plasma mode.

As with the electrons, the system forms a classical Wigner crystal at low temperatures (typically less than 200mK). At higher temperatures the system can probably exist either as a fluid or as a hexatic, and studies of these high temperature phases are in progress. Much experimental work has concentrated on the crystal phase. Two examples of such work will be described in more detail: the development and application of *capillary wave crystallography*, which has included a demonstration of the lack of long - range crystallographic order in two dimensions; and a study of *damage and annealing* in a two - dimensional crystal.

ヘリウム液面に実現する変った低次元系

物性研究所 河野 公俊

量子液体であるヘリウム(He)の表面は清浄でまた単純な構造を持つ表面である。下地の液体の量子力学的性質を反映した特異な表面物性を示すことが期待される。ここでは主に、He液面上に吸着された2次元電子系を用いた量子液体表面研究のこれまでの成果について報告するとともに今後の研究の方向について述べる。

He液面上の2次元電子系は量子液体の表面現象を研究するための重要なプローブであり、液体 ^3He 表面上の2次元電子系を用いた、フェルミ液体表面およびP波超流動体の自由表面についての研究などを行っている。2次元電子系は低温でウィグナー結晶に転移することが知られている。結晶化に伴ってHe液面は変形してウィグナー結晶と整合した「くぼみ格子」を形成する。くぼみ格子とともに動くウィグナー結晶に働く抵抗力はくぼみ格子による ^3He 準粒子の散乱によって理解できることが明らかになった。

20mK以下の温度域では、準粒子間の散乱頻度が減少して、準粒子の平均自由行程が長くなり、準粒子は自由表面によってバリスティックに散乱される。このような領域では、抵抗力は温度によらない一定値を示す。930 μK 以下では、 ^3He は超流動状態に転移し、準粒子の励起スペクトルにギャップが現れるために移動度はギャップを反映した熱活性化型の温度依存性を示す。

磁場を印加することによって、P波超流動の特徴を如実に示すA相を作ることができる。超流動 ^3He -A相はエネルギーギャップに異方性をもち、エネルギーギャップが零となるノードがフェルミ面上に存在する。ノードはフェルミ面の極の位置にあるので、極を結ぶ軸の方向が異方性を記述する重要な方位となる。この軸に平行なベクトルを l ベクトルと呼び、その空間的な配向をテクスチャーという。 l ベクトルはクーパー対の軌道角運動量の量子化軸にほかならない。この l テクスチャーは自由表面に垂直に配向する性質をもつので、表面に垂直に入射する準粒子に対するエネルギーギャップは零となることが期待される。磁場を液面と平行に加えることで、電子の軌道運動への影響を最小限におさえて、超流動 ^3He A相上の2次元電子系の伝導度を測定し、 l テクスチャーによる影響を捕らえることに成功した。今後、測定の定量性を改善し、Andreev散乱の寄与がどの程度のものかなどについて明らかにしたいと考えている。

以上のように、液体He表面にはその量子性を反映した興味深い表面現象が存在することが分かった。これまでの研究は液体の性質を反映した表面現象を主に捕らえたが、今後は、2次元電子系を1mK以下まで冷却することができるようになったことを活用して、セミマクロな量子系としての性質、ナノ物理との接点を意識した研究を展開したいと考えている。

単電子トンネルとメゾスコピック物理

物性研 勝本信吾

単電子トンネル効果に関して、半古典的に説明可能な現象に関しては90年代初頭に集中的に研究され、物理現象の基本に関しては実験的理論的にほぼ解明し尽くされた。しかし、これは単電子トンネルの物理の終焉ではなく、2つの新しい分野のスタートを意味している。それは、量子ゆらぎが大きな領域での量子効果と、他のメゾスコピック系特有の現象との境界領域である。

後者の例として、電子波干渉効果とメゾスコピック超伝導を取り上げる。まず、電子の波動性の端的な現れであるAharonov-Bohm(AB)効果を示す微小リングに、粒子性の現れである単電子帯電効果を示す量子ドットを埋め込んだ構造の伝導を調べた。伝導体にはAlGaAs/GaAsのヘテロ接合2次元電子系、その閉じ込めにはラテラルなショットキーゲートを用いた。

単電子帯電効果によるクーロン振動が観測される領域では、ドット上の電子数のゆらぎが1以下に抑えられるが、そのような領域でもAB振動が観測され、トンネルプロセスの10%以上が電子波のコヒーレンスを保った、いわゆるコヒーレントトンネルであることがわかった。すなわち、電子数固定状態を経てもなお電子を観測したことにはならない。

メゾスコピック超伝導は単電子トランジスタを用いて調べるのに絶好の課題である。すなわち、量子ドット(クーロン島)の部分を超伝導体とすることで微小超伝導体の性質を調べることができる。ここで非常に誤解を生みやすい事柄に、ドット上の電子数の揺らぎと秩序パラメタの位相の揺らぎの不確定性関係がある。ドット上の電子数が固定されると位相揺らぎは当然増え、コヒーレント状態が作れなくなる、すなわち、超伝導の様々な著しい性質が失われるのではないかと考えがちである。この点も簡単に検証できる。微細加工を用いて、超伝導ドット(材質:アルミニウム)を、径が $1\mu\text{m}$ のリング状に作製した。これで単電子トランジスタを構成し、伝導を調べたところ、明瞭なクーロン振動から、クーパー対数の揺らぎが1以下に抑えられていることを確認した。それと同時に、磁気抵抗にフラクソイドの量子化に伴う飛びを伴った振動が現れ、微小リングにおいてコヒーレントな超伝導が保たれていることがわかった。このパラドックスの解決は、「位相揺らぎ」がドットと電極の間の相対位相についてのものであることから容易ではあるが、実験的に明瞭に示せたのは、単電子トンネル効果の応用のためである。

次に、リングではないが、コヒーレンス長程度に大きなドットを作製して同様に磁気抵抗を測定したところ、リングの場合と同様な飛びを伴った振動が見られた。これは、フラクソイドの空間的な閉込め効果によるもので、その意味では「フラクソイドの量子ドット」とみることもできる。

さて、この「量子ドット」内のフラクソイド状態であるが、アプリコソフ格子的にフラクソイドが分散している状態と、中心に大きな量子数のフラクソイドがいる「巨大渦糸」状態の2つが考えられる。いずれが実現しているのかを、単純な単電子トランジスタで調べるのは容易でない。

そこで、インジウムの孤立微小ドットを作製し、STMで超伝導ギャップの空間分布を調べることで、この2状態の区別を調べることを試みた。まだ、プレリミナリな結果であるが、特定の磁場でフラクソ

イド状態が急激に変化する様子がみられ、その磁場では、ドットの中心から外縁部へ向かってギャップが成長していた。これはアブリコソフ状態から巨大渦糸状態への転移によるものと考えている。

超周期構造中の2次元電子系

物性研究所 家 泰 弘

1985年9月に着任して以来、低温輸送現象を主なテーマとして研究を行ってきた。着任から7~8年間は高温超伝導関係や有機伝導体関係の仕事が多かったが、ここ数年は勝本研究室とともに量子輸送関係の研究を推進している。

GaAs/AlGaAs-HEMT試料表面にメソスコピック構造の強磁性体を付加した系を用いて空間変化磁場中の2次元電子系の輸送現象について研究を行っている。空間交番磁場すなわち一様成分がゼロの1次元周期磁場を印加した場合に、電気抵抗に T^2 に比例する項が現われることを見出し、これが超周期を導入したことによる電子電子ウムクラップ散乱の効果と解釈した。この解釈の妥当性を補強する2つの実験を行った。第1に、余剰抵抗が電子電子散乱に起因するものであることの検証として余剰抵抗の電流密度依存性を調べ、 T^2 項の T が格子温度ではなく電子温度で支配されていることを実証した。第2に、磁場変調の方向と電流方向の角度を変えた試料を作製し、1次元周期の逆格子ベクトルを含むウムクラップ過程が効いていることを実証した。特に、磁場変調方向を電流方向から45度傾けた試料では、縦抵抗に現われる余剰抵抗に等しい横抵抗成分がホール端子間に現われることを見出した。変調磁場による余剰抵抗は $\Delta\rho = AT^2 + C$ の形をとる。理論的にはこの系の状況は、不純物散乱による抵抗が支配的である状況で空間変調(ベクトル)ポテンシャルと電子間相互作用を導入したときに伝導度にどのような補正が現われるかという問題として定式化される。最近、物性研の佐々木・福山によって解析的な計算が行われており、実験を良く再現する結果が得られている。電子電子散乱に関する理論を検証するのに適した系である。

ランダム磁場(ランダムベクトルポテンシャル)中の電子輸送は、電子局在の問題や $\nu=1/2$ の複合フェルミオン領域との関係で理論的興味もたれている。強磁性体の配置をランダムにした試料を作製し、その伝導特性を調べている。1次元ランダム配置をとった系では、周期的な系に比べて余剰抵抗が数倍に大きくなる現象が見られている。また2次元ランダム磁場の系では、磁気抵抗の形状が $\nu=1/2$ の複合フェルミオン領域のそれと良く似ていることや、シュブニコフ・ドハース振動の解析から求められる電子有効質量が増大する傾向が見られており、これらに関して検討を進めている。

前述と同様の手法で超伝導体に空間変化磁場を印加することも行っている。2次元正方格子の超伝導(Nb)ネットワークのボンド1つおきに微小強磁性体(Dy)を配した系を作成した。膜面に平行な磁場によって微小超伝導体を磁化すると、ネットワークの隣り合ったブラケットに逆向きの局所磁場がかかり、チェッカーボード状の磁場パターンが実現される。この系の超伝導転移直下における抵抗のLittle-Parks振動の様子をチェッカーボード磁場の振幅をパラメータとして測定し、

それがモデル計算で明らかにされた Hofstadter butterfly の最低エネルギー準位をつないだ包絡線と良く対応することを見出した。

単一クーパー対箱における量子コヒーレンス

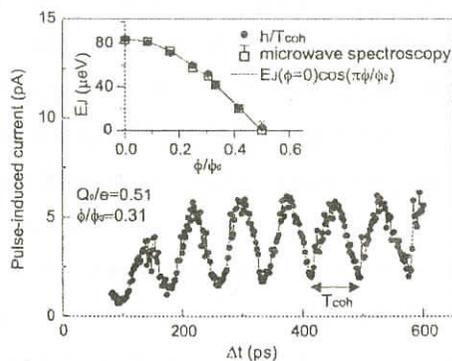
NEC基礎研 中村 泰信

微小ジョセフソン接合を用いた素子「単一クーパー対箱」では微小な超伝導「箱」電極がジョセフソン接合を介してリザーバー電極と結合されている。帯電効果により箱電極内の余剰電荷(クーパー対)数の揺らぎが抑えられる一方で、ジョセフソン効果はクーパー対のトンネルを可能にしクーパー対数が1だけ異なる電荷数状態間の結合を生む。その結果として適当な条件のもとでは実効的に2つの異なる電荷数状態からなる人工2準位系を構成できる。素子は電子線リソグラフィとAlの斜め蒸着法により作製した。なお本実験では弱い外部磁場によりジョセフソンエネルギーが調節できるように接合を2つに分割してSQUIDループを構成している。また大きなトンネル抵抗を持つ接合を介して箱電極に取り付けられたプローブ電極は、電圧バイアスされていて、箱電極内のクーパー対数が相対的に1つ多い状態のときのみ選択的に準粒子を2つトンネルさせてクーパー対の存在を観測することができる。実験は温度30mKにて行った。

我々は高速のゲート電圧パルスを用いてこの2準位系の量子状態を制御できることを実証し、2状態間のコヒーレントな時間発展を示す振動を観測した。図は、パルスゲート電極にパルスを繰り返し印加した時にプローブ電極を流れるパルス誘起電流を、ゲート電圧パルスの長さの関数としてプロットしたものである。パルス長の時間だけ2つの電荷数状態が縮退し2状態間でコヒーレント振動が起こっている様子が、多数のパルス制御の繰り返しによる試行平均の結果、直流電流として観測された。また挿入図には、振動の周期から求めたジョセフソンエネルギーの大きさをSQUIDループ内の磁束の関数としてプロットしている(黒丸)。この結果は、独立かつ相補的な実験すなわち2準位系の固有状態間のエネルギー準位分裂のスペクトロスコピーにより求められたジョセフソンエネルギーの大きさ(四角)とよく一致した。また期待される cosine 型の磁場依存性を示した。この実験結果は固体素子における量子ビット制御の実現として注目されている。今後量子ビット制御の高精度化・デコヒーレンス要因の解明・試行平均に依らない強い量子測定の実現・複数量子ビット間のゲート演算の実証などが期待される。

参考文献

Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin, and J. S. Tsai, Nature **398**, 786 (1999).



強磁性単一電子トランジスタの磁気抵抗

筑波大学物理学系 大塚 洋一

強磁性金属微小トンネル接合系はトンネル磁気抵抗効果(TMR)をはじめとしたスピン依存トンネル現象と電荷の離散性に基づく一電子帯電効果などの絡む新しい現象が期待できる場であり、また応用の観点からも興味深い系である。我々は強磁性金属で作られた単一電子トランジスタの低温における電気伝導を調べてきたが、その中でSETの電気抵抗が外部磁場に対して振動する磁気クーロン振動と、TMRがクーロンブロッケイド領域において著しく増大するという二つの現象を見いだした。本講演では主に前者についてそのメカニズムと実験結果について述べる。

磁場中におかれた強磁性金属のフェルミエネルギーはゼーマン効果によって $\Delta\epsilon_F = -Pg\mu_B$, $H/2$ だけ変化する。ここで、 P はフェルミ準位におけるスピン偏極率であり、状態密度 D を用いて $P=(D_+-D_-)/(D_++D_-)$ で与えられる。SET構造において、このエネルギー変化が1電子帯電エネルギーを凌駕すると島電極の電荷数の変化が起こり、これが抵抗の周期的変化となって現れる。その周期は、次式で与えられる。

$$|P_{\text{island}} - P_{\text{lead}}| g\mu_B \Delta H = 4E_c$$

以上のモデルは Co/Ni/Co^- , Ni/Co/Ni^- , Al/Co/Al^- , Al/Co/Al , Al/Al/Al^- 等のSETに関する実験結果を、 $P_{\text{Ni}} < P_{\text{Co}} < P_{\text{Al}} = 0$ と仮定すると矛盾無く説明する。超伝導/強磁性トンネル接合を用いた実験で得られるスピン偏極率はトンネル電子の偏極率であり、Ni, Coいずれの場合も正值であるが、バンド計算の結果による $P_{\text{Ni}} < P_{\text{Co}} < 0$ とは一致しない。一方本実験で現れる P は熱力学的量としての偏極率であり、状態密度の情報を直接反映する。

なお、最近行った Al/Ni/Al -SETにおいて定量的に理論の予想と食い違う結果が得られた。この原因はまだ不明であり、今後の研究が必要とされる。

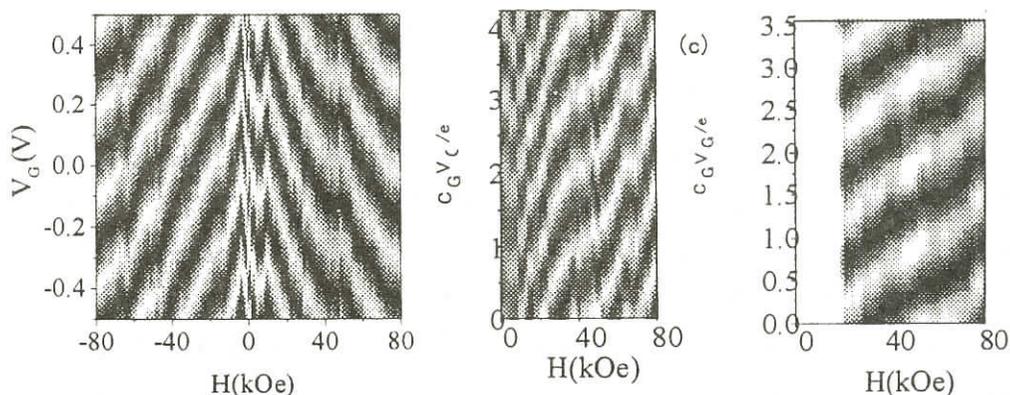


Figure 1: Gray-scale plots of the zero-bias resistance or conductance for (a) Ni/Co/Ni^- , (b) Co/Ni/Co^- and (c) Al/Co/Al^- SETs.

第一原理電子状態計算による銅表面上でのメタノール合成反応の研究

JRCAT - 融合研 森 川 良 忠

JRCAT - A T P 岩 田 圭 司

JRCAT - 融合研 寺 倉 清 之

固体触媒において活性サイトを同定することは、触媒反応機構を知る上で重要である。表面科学の手法は固体表面を原子レベルで観察することを可能にした。しかしながら、反応中の表面を観察するのはまだ難しく、また、表面のステップや格子欠陥サイトなど、特別な形状を持つ表面のごく一部分が触媒反応に対して重要な役割を持っている場合があるため、活性サイトを実験的に同定するのは困難な場合が多い。密度汎関数法を用いた計算手法の進歩により固体表面上での原子分子の反応過程についても精度のよい計算が可能になってきた。そして、実験結果と詳細に対応させることにより、反応機構を解明する有力な手段となる可能性を持っている。本研究では工業的に用いられているCu/ZnO触媒を用いたメタノール合成反応の反応機構、特にZnの触媒反応促進機構を明らかにするために、最近、単結晶銅表面を用いて行われた赤外吸収スペクトル、コアレベルシフト、熱分解などの実験結果と対応させながら、反応の中間体とZnとの共吸着状態、そしてそれらの中間体の水素化反応経路の計算を行った。その結果、Zn蒸着Cu表面の構造は反応前と反応中では大きく変わり、それによって反応の活性サイトが生成している可能性があることが示された。

アルミナ表面における水素分子のオルソ・パラ変換とオルソ・パラ分離

東京大学生産技術研究所 馬 込 保

福 谷 克 之

岡 野 達 雄

水素分子には合成核スピン3重項状態（オルソ水素）と1重項状態（パラ水素）の2つの状態が存在し、気相における衝突や電磁波放出などの相互作用によるオルソ-パラ間の遷移確率は $10^{-9}/s$ 程度と非常に小さい。磁性体の存在下では磁気双極子相互作用によりオルソ-パラ転換が促進されることが知られているが、近年AgやCu等の非磁性の固体表面でもオルソ-パラ転換が促進されることを示唆する実験が報告されている。本研究ではレーザー共鳴イオン化法を用いて回転およびスピン状態を弁別測定することにより、メソポーラスアルミナ表面への水素分子の吸着と脱離の実験を行い、表面におけるオルソ-パラ転換と分離に関する考察を行った。回転量子数(J)が0の水素分子の熱脱離スペクトルを測定したところ、20Kと35Kにピークを持つことがわかり、これらはアルミナ粒子の表面と細孔内部に吸着した水素に対応すると考えられる。一方J=1の分子の熱脱離スペクトルを測定すると、37Kに単一のピークが観測されることがわかった。このことから粒子表面では

オルソ-パラ転換が起きており、また細孔内部では $J = 1$ の分子のほうが $J = 0$ に比べて吸着エネルギーが大きいと考えられる。吸着エネルギーの回転量子数依存性は、分子の吸着ポテンシャルが分子配向に依存することを示しており、理論計算の結果と対比させると分子軸を表面垂直にするほうが安定であることを示唆する。

Pt(111)表面上のNOの吸着構造

東大生研 松本益明

福谷克之

岡野達雄

東大物性研 常行真司

低温 (<100K) の Pt(111) 表面上での NO 分子の 2×2 構造について走査トンネル顕微鏡 (STM), 昇温脱離法 (TDS), 高分解能電子損失分光法 (HREELS), 低速電子回折法 (LEED) を用いて研究した。100K 以下で飽和吸着させた後、200 - 250K に加熱することによって鮮明な 2×2 の LEED パターンを得ることができる。この構造についてはこれまでオントップサイトに直立して吸着した NO 分子によると考えられてきた。我々は STM 像と HREELS スペクトルから異なる 2 つのサイトに同時に吸着した NO 分子により構成され、その被覆率は 0.5 ML ($1 \text{ ML} = 1.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$) であることを確認した。さらに LEED の動力学的解析を用いることにより NO 分子は面心立方の窪み位置 (fcc ホローサイト) とオントップサイトに吸着し、オントップサイトに吸着した NO 分子は約 50 度傾いていることがわかった。この解析結果は最近相澤らによって行なわれた第一原理計算の結果とよく一致している。NO 分子は低被覆率では fcc ホローサイトにまず吸着すると考えられるが、LEED パターンがディフューズであること、HREELS の 2 番目のピークが 0.2 ML 以下から増大し始めることから、fcc ホローサイトが飽和する前にオントップサイトへの吸着が開始されると考えられる。NO の吸着量を 0.5 ML 以上に増すと、HREELS や TDS のスペクトルに新たなピークが観測され、これは STM 像から六方細密 (hcp) ホローサイトに吸着した NO 分子であると考えられる。

HREELSによるIn/Si(111)-(4x1)表面の研究

東北大学大学院理学研究科 坂本 一之
 芦間 英典
 須藤 彰三
 内田 和喜男

Inを吸着させたSi(111)表面は吸着量に依存した様々な表面構造を示すことが知られている[1]。そのうち、角度分解光電子分光(ARPES)などにより室温において金属的な電子状態を持つIn/Si(111)-(4x1)表面は、100K近傍で電荷密度波をともなった金属-絶縁体転移を起こすことが最近報告された[2]。しかし、電子状態についてはよく知られているものの、In/Si(111)-(4x1)表面の振動状態に関する報告はなく、構造については様々なモデルが提案されているが決定にはいたっていない。そこで我々は高分解能電子エネルギー損失分光法(HREELS)による振動状態と電子励起の測定により、構造モデルの決定と、金属-絶縁体転移に関する詳細な知見を得ることを目的として研究を行った。その結果、温度に依存した弾性散乱ピークの半値幅の変化より130K近傍で転移が起っていることを確認した。しかし、室温で観測される表面の金属的な性質に由来するDrude tailは強度が弱くなるものの、90Kにおいても観測された。これは90Kにおいて表面が金属的であることを示す。半値幅とtailの矛盾する結果は、ARPESで報告されている3つの金属的な表面電子準位のうちの1つだけがパイエルス転移により半導体的となり、他の2つが金属的な性質を保っているためであると考えた。また、今回我々が低温において60meVに初めて観測した表面Si原子による分散のほとんどないフォノンの存在は構造の決定に大きく寄与するものであると考えている。

[1] for example, H. Hirayama et al., Appl. Surf. Sci., **33/34**, 193 (1988).

[2] H.W. Yeom et al., Phys. Rev. Lett. 82, 4898 (1999).

Cu(111)の時間分解二光子光電子スペクトルに対する電子間クーロン相互作用の効果

阪大工 坂上 護
 笠井 秀明
 和歌山高専 興地 斐男

最近、フェムト秒時間分解二光子光電子分光法によってCu(111)表面近傍に励起された電子の超高速ダイナミクスが盛んに研究されている[1-3]。そこで本研究では、この二光子光電子放出過程を微視的な立場から記述し、非平衡摂動論[4]によって実験結果の解析を行った。Cu(111)からの

二光子光電子放出過程では、まずポンプ光により準粒子（電子や正孔）が励起され、次にそれらの準粒子の電子間クーロン相互作用による散乱に伴い、鏡像力表面状態への電子遷移とフェルミ準位近傍への二次準粒子の励起が起これ、最後にプローブ光により鏡像力表面状態の電子が真空準位の上へ励起され光電子として放出される。そのため、電子間クーロン相互作用の効果によって、コリレーショントレース（光電子強度のポンプ・プローブ遅延時間依存性）はポンプ光により励起された準粒子と二次準粒子の寿命に依存する。その結果、実験で観測されているように、コリレーショントレースはポンプ光エネルギー依存性[1,2]と温度依存性[3]を示す。講演では、数値計算結果に基づき、このような電子間クーロン相互作用の効果を定量的に議論する。

- [1] T. Hertel, E. Knoesel, M. Wolf and G. Ertl: Phys. Rev. Lett. **76** (1996) 535.
 [2] M. Wolf, E. Knoesel and T. Hertel: Phys. Rev. B **54** (1996) R5295.
 [3] E. Knoesel, A. Hotzel and M. Wolf: J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. **88-91** (1998) 577.
 [4] M. Sakaue, H. Kasai and A. Okiji: J. Phys. Soc. Jpn. **69** No.1 (2000).

STMにより誘起されるCu(100)上のアセチレンの回転機構 - その微視的理論

阪大工 長谷川 和彦

笠井 秀明

Wilson A. Diño

和歌山高専 興地 斐男

STM探針から電子がCu(100)上に吸着しているアセチレン(C_2H_2 , C_2D_2 , C_2HD)のC-H(C-D)の局在軌道を経由して金属表面へトンネルするとき、アセチレンの回転運動が表面上で誘起されることがある[1,2]。この中間過程には、C-H (C-D)伸縮振動が励起されずにアセチレンの束縛回転モードが励起される過程とC-H (C-D)伸縮振動が最初に励起され、その励起された伸縮振動が緩和するにつれて、アセチレンの束縛回転モードが励起される過程がある。その束縛回転モードの励起が分子を回転させるために必要なエネルギーしきい値を超えたときアセチレンは回転する。このように考えて、「STMにより誘起されるCu(100)上のアセチレンの回転運動」を記述する微視的な理論を提案した。詳細については[3]に譲るが、束縛回転モードのエネルギー準位の間隔、分子を回転させるために必要なエネルギーしきい値、C-Dの伸縮振動エネルギーとその寿命などのモデルに含まれるパラメーターに実験結果からの推定値を用い、また、密度汎関数法に基づく計算結果から推定されるC-Dの伸縮振動とアセチレンの束縛回転運動との結合を考慮し、アセチレン

の回転確率の計算を行った。その結果、実験結果を再現することができた。

- [1] B.C. Stipe, M.A. Rezaei and W. Ho, Phys. Rev. Lett. **81** (1998) 1263.
- [2] B.C. Stipe, M.A. Rezaei and W. Ho, Phys. Rev. Lett. **82** (1999) 1724.
- [3] K. Hasegawa, W.A. Diño, H. Kasai and A. Okiji, Surf. Sci. in press.

電子-イオン・コインシデンス分光法による光刺激イオン脱離反応：PMMA薄膜

広島大理 関谷 徹 司
池 永 英 司
藤 井 健太郎
安 井 良 水
サーダースイダルアミン
和 田 真 一
田 中 健一郎
物構研 間 瀬 一 彦
千葉大工 上 野 信 雄

近年、内殻励起による固体表面からのイオン脱離の研究が行われており、サイト選択的な脱離が観測されるなど反応制御の観点からも興味深い。内殻励起した分子からのイオン脱離機構としてオージェ刺激イオン脱離が提唱されているが、この反応の解明にはオージェ電子とイオンのコインシデンス分光が不可欠である。ここではPMMA(ポリメチルメタクリレート)薄膜について、オージェ電子-光イオン・コインシデンス(AEPICO)分光法を用いた炭素の内殻励起によるイオン脱離反応の研究を紹介する。実験は、広島大学放射光科学研究センターの放射光光源HiSORのBL13で行った。PMMA薄膜の全イオンの脱離効率は、炭素1s電子の $\sigma^*(O-CH_3)$ 軌道への共鳴励起に対応して非常に増大しており、最も強度の大きい CH_3^+ イオンの脱離がO-CH₃の反結合性軌道への励起により促進されていると考えられる。PMMAをこのエネルギーで励起したときのAEPICOスペクトルでは、 H^+ イオンや CH_x^+ ($x=1-3$)イオンが観測されるが、電子のエネルギーによってイオンの信号強度が異なる。特に、ある電子エネルギー(270eV)では CH_3^+ イオンのみが非常に大きく観測されるなど、イオン脱離がオージェ終状態で生成される正孔の結合性や局在性に強く依存していると考えられる。

Si(111),(001)面の2光子光電子分光

横浜国大 首藤健一
 千葉大 武田新也
 理研 宗像利明

2光子光電子(2PPE)分光法には基底状態と励起状態の双方を同時に特定できる特徴がある。だが半導体表面に関しては両者間の共鳴による測定は報告されていない。本研究ではSiの(111),(001)表面で光遷移の共鳴を求め、基底状態と励起状態の準位を同定した。Si(111)表面のスペクトルには線幅の狭い3つの構造があった：a)表面ダングリングボンド励起準位($E_F+0.6\text{eV}$)からの信号。b) $h\nu \cong 3.8\text{eV}$ で生ずるバックボンド占有状態($E_F-1.88\text{eV}$)から積層欠陥の空状態($E_F+1.95\text{eV}$)の遷移によるピーク。c) $h\nu \cong 4.0\text{eV}$ で基板励起で $E_F+3.5\text{eV}$ にある準位からのピーク。特に(b)はp偏光で顕著に現れるために表面に局所的であると考えられ、UPSやIPESの測定結果と概ね一致する。両準位間の遷移が今回初めて観測されたのは、入射光が共鳴しているためである。基盤の信号(c)も共鳴で選択的に生じ、(001)面でも同様であった。

これらの光遷移による励起は、入射光(エネルギー、偏光)が共鳴したときに選択的に引き起こされる。選択則を考慮した光を照射することで、2PPEにより半導体表面で基底・励起準位を分光できることを明らかにした。特定準位状態への選択的な光励起で表面反応の制御が行える可能性を示唆している。

Ni(100)表面に誘起された一次元鎖構造

理研 米田忠弘
 川合真紀

表面における化学的に活性な箇所、例えば原子ステップは薄膜形成等においても構造形成のテンプレートとなり、低次元系の材料構築においても重要な役割を果たす。しかしながら、ステップの構造制御は容易ではなく、それがよく規定されたテンプレートとしての役割を制限する原因ともなっている。ここでは一般的には直線的なステップが形成されにくい金属表面において水素吸着によって形成されるストレスが原因と考えられる、一次元構造が形成されること、およびそれらが直線性のよい表面上での化学的に活性な箇所として働くことを示す。実験には低温で動作するUHV-STMを用いて行った。サンプルNi(100)表面は通常の清浄化を行った後に $\sim 100\text{K}$ に冷却し、分子状水素ガスに露出し、水素飽和吸着面を形成した。Ni(100)-1x1:H表面は水素原子がNi原子の4 fold hollow siteに吸着するとされており、超構造は報告されていない。この表面をSTMで観測すると、特徴的な構造とバイアス依存性をもつadded-rowとmissing-rowの対で生じる一次

元直線状の構造が形成される。これらはステップに垂直方向に優先的に形成されることから、水素吸着により格子が広がろうとするストレスを緩和するために生じた構造と考えられる。この表面に butadiene(C_4H_6)を吸着させた系において、この構造が化学的活性点として働くことを示す。

イオン性分子結晶表面の特異な安定化機構と相転移

筑波大学物理工学系・CREST 石田 真彦
重川 秀実

BEDT-TTF系の低次元有機伝導体結晶は、イオン性の分子間結合を持ち、また各分子が層状に積層している為、極性を持った分子が表面に表れる。このような物質では、結晶全体の電荷バランスを保つために、最表面層の電荷量が変化する。従来、多くの分子性結晶はバルク構造に極めて近い表面構造を示すことが知られてきたが、BEDT-TTF系有機伝導体では、上記電荷量変化が表面状態に影響を与える可能性が高い。実際、 β -(BEDT-TTF) $_2$ PF $_6$ 表面のSTM観察により、無機結晶と同様の機構で表面再構成が発現することを初めて確認した。また同試料は、約297Kで金属-絶縁体相転移を起こすが、STMによる観察と理論計算の結果、表面に現れるCDW構造も表面の電荷量変化に強く影響を受け、バルク内のCDW相とは異なる構造を取ることが明らかになった。更に、同試料の表面では、上記要因だけでは説明できない特異な周期構造が観察される。分子軌道計算によるSTM像解析の結果、結晶を構成する分子自身の構造緩和に起因することを確認した。構成要素が分子である為、結晶構造だけでなく構成分子自身の構造が表面構造の形成に関与し、隣接する分子配列の対称性が崩れ周期構造が誘起される分子性結晶特有の現象の存在を示したものである。

M. Ishida et al., PRB 55 (1998) 6773, PRL 82 (1999) 596.

GaP($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$) 超構造表面のSTM観察

奈良先端大 服部 賢
石原 健太郎
大門 寛

東大物性研・CREST 小森 文夫

リン化ガリウム(GaP)は光デバイスの基礎的な半導体結晶の一つであるが、その表面構造については、劈開面である(110)表面を除いてあまり知られていない。そこで、我々は他の代表的な結晶面として($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$)極性表面に注目し、走査トンネル顕微鏡法(STM)と低エネルギー電子線回折法(LEED)を用いて、その表面構造を調べた。今までにこの表面をLEEDを用いて2グループが

調べているが異なる解析結果を報告している。即ち、BommelとCrombeenは 17×17 超構造[1]、一方、Wangらは $\sqrt{247} \times \sqrt{247} R22.7$ 超構造[2]と結論している。この矛盾は、表面構造が複雑でLEEDのみでは解析が困難であることに起因する。

我々が同時にSTMを用いてこの表面を観察したところ、表面には6つのドメインが存在し、各ドメインは同じ方向をもつ列(列間距離1.3nm)から構成されることを見いだした。また、列内の原子像から、列方向の原子構造はすべて周期的であるが、列間方向についてはその周期性が同相と半相ずれている2つ場合がランダムに存在することが分かった。

[1] A. J. Van Bommel and J. E. Crombeen, Surf. Sci., 93, 383(1980).

[2] X. Wang, X. Y. Hou, X. M. Ding, G. S. Dong, X. K. Lu, and P. Chen, in 'Surface Physics and Related Topics - Festschrift for Xide Xie' (World Scientific, Singapore, 1991) p. 326.

STM誘起連鎖反応による重合分子鎖の生成

理 研 大 川 祐 司
阪大工 青 野 正 和

固体表面に自己組織的に形成される有機分子膜の構造をナノスケールで制御することは、分子を利用したナノスケールの配線手法や、機能性分子デバイスの開発へと応用、発展できると期待される。本発表では、走査トンネル顕微鏡(STM)の探針による刺激により連鎖反応を誘起することで一次元重合分子鎖を作る手法に関して報告する。ジアセチレン化合物の一つである10,12-ペンタコサジン酸をグラファイト基板上に吸着し、大気中にてSTM観察を行った。その結果、分子が自己組織的に秩序構造を作って配列することを見いだした。ここに紫外線を照射すると、光重合反応が起こり、生じた重合鎖が定電流モードでのSTM像で高く見える直線構造として観察された。また、モノマー分子膜の一点でSTM探針にパルス電圧をかける事によっても、光重合反応で生じた重合鎖と同様にSTM像で高く観察される直線構造が生成することがあることがわかった。このことから、STM刺激により連鎖重合反応が誘起されたと結論される。STM刺激反応は、正負どちらのバイアスでも約±3Vから誘起することができた。STMの一度の操作だけで、一分子巾の長い構造を瞬時に描くことができ、新しいナノ構造作成法として期待できる。

ELSLEED 法による表面電子バンド中のプラズモンの分散測定

東京大学大学院理学系研究科 長尾 忠昭

長谷川 修司

プラズモン分散やフォノンのダンピング、吸着原子の脱励起、表面の光学特性など、固体表面近傍の電子系による動的スクリーニング現象は40年以上に亘って広く興味を集めてきた。特に近年、高分解電子エネルギー損失分光による角度分離測定から表面誘起電荷の微視的な分布と表面プラズモン分散との対応関係を議論することが盛んに行われている。しかし、表面プラズモンの周波数は多くの場合固体内部の物性を強く反映するため、我々が強く興味を持っている半導体表面・界面近傍の電子構造もしくは電荷分布にはあまり敏感ではない。一方、表面プラズモンではなく、低次元プラズモンのエネルギー分散関係が測定できれば表面・界面の電気特性をより直接的にプローブし、議論できる可能性があり、表面・界面物性に関する多くの知見をもたらすものと期待できる。しかし、半導体表面・界面の伝導電子は金属に比べそのキャリア濃度が低くまた誘電率も一般的に高いためプラズモン振動数は低く、EELSの弾性散乱ピーク近傍の高いバックグラウンドに隠れ観測が難しかった。またプラズモンエネルギーはブラッグ反射ピークのごく近傍で鋭く分散するため、従来のEELS装置の角度分解能では分散測定は非常に困難であった。

我々は波数分解能が従来の装置より1桁高いHREELS装置 (ELSLEED; Henzler EELS)を用いれば半導体表面の低次元プラズモンのエネルギー分散関係を測定できると考え、その観測を試みてきた。その結果、実際に我々が予想していたとおり、 $\text{Si}(111)-\sqrt{3}\times\sqrt{3}-\text{Ag}$ 表面の表面電子状態中の伝導電子のプラズモンの分散関係の測定に成功し、そのエネルギー位置および分散関係が理論から予想される2次プラズモンの分散式にはほぼ一致することを確認した。また、表面電子バンドのエネルギー位置をAg原子の追加蒸着量により制御することで2次元電子の面密度を変化させると、それに追従してプラズモン周波数も上下することを発見した。さらに、銀原子の追加蒸着によりプラズモンピークの半値幅が増加することを見出し、プラズモンがイオン化（もしくは分極）した吸着子により強く散乱されことを確認した。表面電子バンド中のプラズモン分散を測定した例は本研究が世界初である。また、2次元プラズモンの分散関係およびその緩和を本研究のように明瞭に、かつそのデータをあいまいさ無く解釈した例も我々の知る限りいまだかつて存在せず、今後の研究の発展が楽しみである。

Si(100)2×1表面上における1,4-シクロヘキサジエンの吸着状態

東大物性研 山下良之
 浜口香苗
 町田真一
 向井孝三
 吉信淳二

二重結合を二つ持つ有機分子とSi(100)2×1面との相互作用は興味深い。未反応の二重結合を残して吸着すると、その上に化学反応を行うことが可能となり、シリコン上に機能性有機分子の構築が可能となる。そこで、本研究では二重結合を二つ持つ1,4-シクロヘキサジエンをSi(100)2×1面上に暴露し、その吸着状態をHREELS及びSTMにより調べた。

HREELSによりC-H(sp²)振動由来の種々のピークが観測されたことから、1,4-シクロヘキサジエンはC=C結合を一つ残してSi(100)2×1表面上に吸着していることがわかった。また、そのSTM像では、吸着分子はダイマー間のほぼ中央にCH(sp²)軌道由来のものであると予想される二つの突起をもち、ダイマー列に対称な電子状態をもつことも明らかになった。このことから、1,4-シクロヘキサジエンはSi(100)2×1表面に二重結合を一つ残してかつCs対称で吸着し、その未反応の二重結合は真空側にはりだし、ダイマー間のほぼ中央に位置することがわかった。

Si(100)2×1面上における1,4-シクロヘキサジエンの電子状態の観測

東大物性研 浜口香苗
 山下良之
 町田真一
 向井孝三
 吉信淳

Si(100)2×1面上に原子スケールで構造を制御した新奇な構造を作製するための基礎的研究として、Siダングリングボンドと不飽和炭化水素との反応について調べた。Si(100)面上のダイマーのダングリングボンドは、炭化水素の二重結合と反応してdi-s結合することが知られている[1]。そこで二重結合を複数もつ有機分子を反応させることにより、Si表面上に有機化学を展開し新しい材料を構築できる可能性がある。

本研究ではSi(100)2×1清浄面上に、二重結合を二つ持つ1,4-シクロヘキサジエンを吸着させ、その吸着状態を調べるために低速電子線回折(LEED)と、シンクロトロン放射光を利用した光電子分光(SRUPS)の測定を行った(UVSOR BL5A)。

LEED測定では吸着前後ともに(2×1)構造を示し、分子とダイマーとが1:1で反応していることが分かった。またSRUPSでは、分子を吸着した後、入射光の電気ベクトルとSiダイマー列が平行である時にはp結合に由来するピークが一つ見られたが、垂直な時には観測されなかった。軌道対称性選択則を利用することにより、二つある二重結合のうち一つだけがSiダングリングボンドと反応し、その残った二重結合はダイマー列に垂直な方向に配列していて、吸着分子はCs対称性を持つことが分かった。

会場では、シクロペンテンとシクロヘキセンの吸着状態の結果も併せて報告した。

[1] J. Yoshinobu, et al., J. Chem. Phys. **87**(1987) 7332

窒素吸着Cu(001)表面におけるコバルトと鉄島構造の成長

東大物性研 大野 真也
向井 孝三
中辻 寛

東大物性研・CREST 小森 文夫

銅の(001)表面に窒素イオンを照射し、アニールするとc(2×2)原子配列をもつ方形の窒素吸着による島が格子状に規則配列することが知られている[1]。窒素吸着による島は一辺が平均5nmであり、<100>方向に平行に並んでいる。島と島の間は狭い銅の清浄表面によって隔てられており、銅の清浄表面部分は2次元の編み目模様を形成する。

この表面に、Co,Niを蒸着させると、窒素の島に覆われていない下地の銅表面に選択的に吸着し、ドットや細線が形成される[2]。

我々は、室温で格子状のc(2×2)-N/Cu(001)表面にFe,Coを蒸着させ、STMによる構造観察を行った。その結果、薄膜の初期成長においてCoでは2-3nmのCu細線上で吸着が起こり1MLの細線格子が形成されるが、Feでは格子点での島形成のみが起こることが明瞭に示された。Co蒸着では細線格子が形成された後、格子点上での選択的な吸着が起こり、1-2MLのドットの格子が形成される。一方、Fe蒸着では低蒸着量において下地銅の交差点上に形成されたFeドットは互いに孤立し、島の高さは1-2MLである。蒸着量を増やし、Feドットどうしが接触・融合する状況では高さが2MLの円筒形のドットに成長する。さらに、c(2×2)-N飽和表面上のFe吸着構造を調べたところCu上に成長した場合に比べて島成長の度合いが大きいことを見出した。

参考文献

[1] F. M. Leibsle et al., Phys. Rev. **B47** (1993) 15865.

[2] Y. Matsumoto and K. Tanaka, Jpn. J. Appl. Phys. **37** (1998) L154.

ABリング磁気抵抗振動に及ぼすスピン軌道相互作用の影響

NTT物性科学基礎研究所 新田 淳 作
 J. W. Berghuis
 F. E. Meijer
 高柳 英 明

電界が電子スピンの位相を変調する効果として、アハラノフ・キャシャー(AC)効果が予言され、スピン軌道相互作用を用いたAC効果の観測の可能性が指摘されてきた。InGaAs, InAs系二次元電子ガスのスピン分離は、Rashba機構に起因したスピン軌道相互作用によると考えられ、ゲート電圧により制御可能であることが実験的に確認されている。このスピン軌道相互作用に起因した干渉効果を調べるため、局所ゲート電極付きABリングを作製し、磁気抵抗振動のゲート電圧依存性を調べた。

AB振動のゲート電圧依存性は、電子の波長の変化に起因した位相変化 $\Delta\phi_E$ とスピン軌道相互作用に起因した位相変化 $\Delta\phi_S$ がAB振動に変調を与える。ゲート電圧による電子の波長変化にともなう位相変化は、AC効果に起因した位相変化に比べ約23倍程度早いと見積もられる。従って、 $\Delta\phi_E \gg 2\pi$ かつ $\Delta\phi_S \ll 2\pi$ を満たす連続した異なるゲート電圧の範囲で平均化すれば、試料固有の特徴は減少し、スピンに起因した位相干渉のみが生き残ると考えられる。平均化によりAB振動のランダムな位相変化は無くなり、AB振動の振幅がゲート電圧に対し連続的に変化する様子がえられた。このゲート電圧に依存したAB振動の変化は、スピンの干渉効果に起因したものであると考えられる。

Si-MOSFETのエッジチャネル

阪大院理 音 賢 一
 新井 宏一郎
 松林 知也
 鷹岡 貞夫
 邑瀬 和生

量子ホール状態での電気伝導には、量子化ホール抵抗が現れるという顕著な現象の他にも、エッジチャネルの寄与による様々な非局所性の電気伝導が見られる。これはGaAs/AlGaAsヘテロ界面の2次元電子系だけでなく、量子ホール効果の見られる系に普遍的なものと考えられている。実際、GaAs系より2桁も移動度の小さなSi-MOSFET 2次元電子系でも、非局所抵抗を観測して

いる。しかし、これまでSi-MOS FETのエッジチャンネルの広がりなど、エッジチャンネルの詳細に関する実験的研究はほとんど報告されていない。今回我々は、量子ホールプラトーにおけるSi-MOS FETの2次元電子系とゲート間のキャパシタンスを調べ、その極小値は試料周長に比例し、キャパシタンスにエッジチャンネルの寄与があることを確認した。この周波数依存性から求めたエッジ幅は数 μm のオーダーで、GaAs/AlGaAs系に比べても比較的広い。すなわち、試料端での電子の閉じこめポテンシャルがGaAs/AlGaAs系に比べて緩やかな可能性がある。このため、Si-MOSでもエッジチャンネルバルク状態間の分離が大きいためにエネルギー緩和が抑えられ、非局所抵抗などエッジチャンネルによる「伝導の非局所性」が観測されるものと考えられる。

アンダーソン転移点での境界条件に依存したコンダクタンスの分布

Department of Physics, Sophia University TOMI OHTSUKI

Department of Physics, Osaka University KEITH SLEVIN

Department of Physics, Toho University TOHRU KAWARABAYASHI

アンダーソン金属-絶縁体転移点での、コンダクタンスの分布関数とスケーリング関数の境界条件依存性を調べた。転移点でのコンダクタンス g は、試料ごとの揺らぎが大きく、平均値よりも分布関数 $P(g)$ が重要である。この分布関数は試料の詳細やサイズには依存しない普遍的な形を取ることが分かっている[1]。一方、境界条件を変えると、臨界点でのコンダクタンスの分布関数が大きく変わることが最近明らかになった[2,3]。

そこで本研究では、スケーリング補正を取り入れた解析[4]をコンダクタンスと局在長に対して行い、サイズが大きい極限でこれらの量がどのように振る舞うかを決定した。これにより、

1. 臨界指数や臨界点の値は境界条件には寄らないが、
2. サイズが無大でも転移点での物理量が境界条件に依存してしまうことを定量的に示せた。実験に対してこれが何を意味するかを議論する。

[1] K. Slevin and T. Ohtsuki, *Physical Review Letters* **78** (1997) 4083.

[2] C. M. Soukoulis *et al.*, *Physical Review Letters* **82**(1999) 668.

[3] K. Slevin and T. Ohtsuki, *Physical Review Letters* **82** (1999) 669.

[4] K. Slevin and T. Ohtsuki, *Physical Review Letters* **82**(1999) 382.

微小Hubbard鎖の輸送係数

大阪市立大学理学部 小栗 章

我々は、微小な系の輸送現象に対する相互作用の効果をも、電子間斥力の摂動理論に基づき調べている。このアプローチは、基底状態がFermi流体として記述され得る場合に十分低温で有効であり、原理的には様々な系に適用可能である。絶対零度では、準粒子を記述する1体的な有効ハミルトニアンが、Green関数の自己エネルギーを用い微視的に決定され、その散乱係数からコンダクタンスと微小な系をリード線に接続した時の粒子数の変化が求められる。我々は、具体的な計算例を示すため、両端に相互作用のないリード線を接続した微小なHubbard鎖の輸送係数を調べている。このモデル自身は、直列量子ドットやナノメータサイズの原子鎖の模型とも想定できる。我々は、電子-正孔対称な場合において、2次摂動の自己エネルギーから有効ハミルトニアンを決定し、コンダクタンスを求めた。その結果、Hubbard鎖のサイズ N が奇数か偶数かによって、Kondo的振る舞いとMott-Hubbard絶縁体的振る舞いが交互に現れること等がわかった。奇数の場合は、Fermiエネルギーのところに形成されたKondo共鳴が電気伝導に寄与し、特に系に反転対称性がある場合には準粒子の完全透過が起こる。偶数の場合は、例外的な場合を除き、コンダクタンスはサイズが大きくなるとともに減少する。現在、理論を有限温度へ拡張中である。

Co/Alトンネル接合細線におけるスピン注入とホール効果

東北大学工学研究科材料物性学専攻 大谷 義近
石山 智一
深道 和明

強磁性体から非磁性体へ偏極したスピンを注入すると、非磁性体中で偏極したスピンの化学ポテンシャルは増大する。このために非磁性体中にスピン拡散長の範囲で非平衡磁化が生じることが予想される。本研究では、このようなスピン注入により現れる非平衡磁化に着目し、Co/Alトンネル接合細線におけるホール効果を調べた。試料は、強磁性体にCoを、非磁性体にスピン軌道相互作用の比較的小さいAlを用いた。試料作製は、電子線描画法とマグネトロンスパッタリング法を用い、Al部分にホールバーを有するCo/Alトンネル接合細線を作製した。Al細線幅と厚みはそれぞれ $0.5\mu\text{m}$ 、 300nm である。接合部からAlホールバーまでの距離は、 $0.5\mu\text{m}$ および $1.0\mu\text{m}$ である。強磁性体からホールバーまでの距離が $0.5\mu\text{m}$ の場合のみ、スピン注入に伴うホール電圧の変化が観測された。これは、スピン拡散長が $0.5\sim 1.0\mu\text{m}$ 程度であることを示す。零印加磁場においても、ホール電圧の微小な変化が観測された。これは、接合部近傍のCoの残留磁化状態が比較的単純で

あり、非磁性体へスピン注入されていることを示す。Co を飽和するに十分な3Tの外部磁場を基板に対して垂直に印加すると、ホール電圧は磁化状態に対応して増大することより、非平衡磁化による異常ホール効果により発生したと考えられる。このホール効果の増強は、100 K付近より顕著になり、温度の減少と共に増大することが解った。

STM/STS Investigation of Spin Dependent Tunneling with Coulomb Blockade in Insulating Granular Films

東北大金研 千葉 淳
三谷 誠 司
藤森 啓 安

東大物性研 勝本 信 吾

東北大金研・東大物性研 高梨 弘 毅

ナノスケールの磁性金属粒子が絶縁体中に分散した構造を持つグラニューラ膜は、トンネル型巨大磁気抵抗 (TMR) を示す。トンネルに伴う微粒子の帯電エネルギーの増大 (クーロンブロッケイド) がTMRにどのような効果を及ぼすかは、興味深い問題である。我々はこれまでに、クーロンブロッケイドによって通常のトンネル過程が抑制され、高次のトンネル過程が支配的になることによって、グラニューラ系のTMRが低温で著しい増大を示すことを見出した。しかし、グラニューラ系の伝導は、粒径や粒間距離が様々に分布した伝導の統計平均である。本研究では、個々の微粒子間の単一電子トンネルを観測し、そのスピン効果を明らかにするために、STMを用いて走査トンネル分光を行った。試料は、スパッタ法で作製した Co-Al-O, Fe-Al-O, Cu-Al-O の3種類のグラニューラ膜である。室温で単一周期のクーロン階段が明瞭に観測された。また、クーロン階段の周期は、微粒子の帯電エネルギーに対応して、粒径にほぼ反比例する。特徴的なことは、Fe-Al-O および Co-Al-O の場合には、クーロン階段に負性微分コンダクタンスが現れることである。負性微分コンダクタンスは Cu-Al-O の場合には現れないことから、スピン蓄積によって上向きスピンと下向きスピンの化学ポテンシャルに差が生じることに起因することが示唆される。

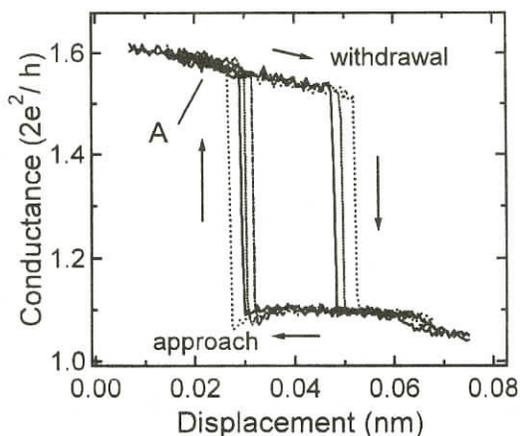
鉄ナノワイヤーの量子化コンダクタンス

東大物性研 中 辻 寛

東大物性研・CREST 小 森 文 夫

数原子程度の太さの非磁性金属ナノワイヤーにおいては、そのコンダクタンスが $G_0=2e^2/h$ を単位として量子化されることが知られている。ナノワイヤーが磁性原子からなる場合には、伝導電子のスピン縮重が解けて $G_0/2$ で量子化されることが期待される。そこで我々は超高真空中、4.2Kにおいて、極低温STMの探針と鉄薄膜との点接触領域に表面垂直方向に形成される鉄ナノワイヤーの電気伝導度測定を行った。図に、探針-下地間の距離変化に伴うコンダクタンスの変化の例を示す。このとき外部磁場はゼロである。ナノワイヤーの数回にわたる伸び縮みにおいて、量子化されたコンダクタンスが再現性良く観測された。ここで特徴的なのは、1)プラトー領域(A)でも緩やかな変化がみられることと、2)ワイヤーの伸び縮みに伴う $1G_0$ 付近から $1.5G_0$ 付近へのコンダクタンスのとびにヒステリシスがみられることである。1)はワイヤーの弾性変形を反映し、2)はワイヤー中の原子のわずかな移動に伴う、透過チャンネル数の変化によると考えられる。また、このような測定を繰り返してコンダクタンスのヒストグラムをみると、量子化の単位が $G_0/2$ に近いことがわかった。このことは、ゼロ磁場下で既に、鉄ナノワイヤーの伝導電子のスピン縮重が解けていることを示唆している。

極低温では原子の動きが抑制され、ナノワイヤーが長時間にわたり安定に存在できるので、外場に対する応答を調べやすい特長がある。そこで、ワイヤーの原子構造を保ったまま1kG程度までの外部磁場に伴うコンダクタンスの変化を測定したところ、変化量は数%以下で、下地薄膜の磁化過程はコンダクタンスに大きな影響を与えていないことがわかった。



液体ヘリウム表面における原子状水素と2次元電子の反応

東大物性研 新井敏一
椎野俊之
河野公俊

液体ヘリウム表面に原子状水素(H)と電子(e^-)が共存した2次元系をつくると、表面の電荷を減少させる化学反応がおきた。これはいったいどういう反応なのかを調べるために、試料容器内に構成した振動容量電気量計(VCE)を用いて0.1-0.4 Kの温度範囲で反応速度を測定した。VCEは簡便・高感度でしかも表面電荷の量に対して直線的に信号が変化するので好都合であった。実験は液面に2次元電子を用意した後、Hを一定量導入してその後の表面電荷の減少する速さを測った。反応速度は低温にするほど速く、このことはHが気相と吸着相の間で平衡状態にあり、低温ほど吸着相の密度が大きくなって面内での衝突頻度が増すというモデルで理解できる。また、定量的な解析により、 e^- の減少速度はHの面密度に関して2次の速度式で表されることがわかった。したがってこの反応は、例えば $H+H+e^- \rightarrow H^-+H$ のような3体衝突によって起こるものであるとすることができる。ただし、生成物に関してはこれから調べるべき課題であり、 H^- 以外であるかもしれない。反応の進行にともなって表面電荷が減少するので、生成物のうち電荷をもつ粒子は表面にとどまらずに液の中にもぐることは確かである。

Surface smoothness of liquid ^3He at ultra - low temperatures.

ISSP, University of Tokyo O. Kirichek
M. Saitoh
K. Kono

The transverse optical plasma resonance (TO) of Wigner Solid is used for the study of the superfluid and normal ^3He surface properties. The frequency of the TO resonance gives the information about Wigner Solid coupling with helium surface. The collision time of surface electrons obtained from line-width of TO resonance is determined by interaction with surface roughness of liquid ^3He . It is shown that the collision time follows single-electron-ripplon scattering (SERS) theory in temperature range from 300 mK down to 70 mK. The deviation of the collision time from SERS theory below 70 mK could be explained by vanishing of propagating riplons due to dramatically increasing liquid ^3He viscosity. The collision time becomes independent on temperature below 10 mK because

ripples are completely damped and another kind of scattering process determines the dissipation in the system. Below superfluid ^3He transition at 0.93 mK collision time starts to rise, that could be evidence for the reduce of surface roughness of liquid ^3He in superfluid state.

Vortex state in microfabricated superconducting disk probed by tunneling spectroscopy

CREST, JST Maxim Zalalutdinov
 ISSP, University of Tokyo Hiroyuki Fujioka
 Yoshiaki Hashimoto
 ISSP, Univ. of Tokyo, CREST Shingo Katsumoto
 Yasuhiro Iye

Anomalous vortex structures: giant multi-quanta vortex and peculiar multivortex configurations are anticipated when perpendicular magnetic field penetrates inside mesoscopic superconducting disks, whose radii and thickness are comparable or less than the penetration depth λ and the coherence length ξ . In the present work STM - STS technique was used to obtain local tunneling spectra in order to identify configuration of the order parameter and hence - the vortex state in superconducting Indium disks with 500nm radius and 32nm height, fabricated by the electron - beam lithography. Magnetic field dependence of the tunneling gap at the center of the disk reveals hysteresis and reentrant behavior, which could be attributed to the switch between different vortex configurations. Spatial distribution of the gap along the disk radii was tested in particular magnetic field $H=115\text{G}$, for which gapless state at the disk center supposed giant vortex state. Detected increase of the tunneling gap in Y direction toward the disk boundary was in accordance with the behavior expected for a giant vortex state. However, in X direction the periphery of the disk was gapless, while full superconducting gap was observed in narrow region about the middle of the radius. Though this suggests that the giant vortex is distorted by some sort of disorder present inside the indium disk, it would also be possible that some unexpected vortex state was observed.

超伝導SETトランジスタの特性と量子ホール効果状態測定への応用

東大物性研 藤岡博幸

遠藤 彰

東大物性研・CREST 勝本信吾

家 泰弘

量子ホール状態における輸送現象は、試料端に形成されるエッジ状態が重要な役割を果たしていることが知られている。しかし、特に分数量子ホール状態のエッジ状態については実験的にも理論的にも未だ決定的なモデルはない。エッジ状態の電荷分布等を測定するためには、空間分解能を持った測定が必要であり、電気伝導測定では困難である。近年、単電子トランジスタ（SET）を用いることで静電ポテンシャルを高い精度と空間分解能で測定することが可能であることが示され、2次元電子系を研究する有力な手段となることがわかってきた。そこで我々は2次元電子系上にSETを作成することで分数量子ホール状態におけるエッジ状態および電荷分布に関する情報を得ることを目的とした実験を行った。

SETを電位計として用いるためには、測定時間の間安定して動作することが必要となる。そこでこれを目標としてSETを作成し、30mKで特性を測定した。その結果10時間以上にわたって安定した動作をすることを確認できた。また、超伝導SETに特徴的なJQPサイクル、シンギュラリティマッチング等のIV特性の構造を確認した。同様のSETを2次元電子系上に作成し測定を行った。クーロン振動の磁場によるシフトを測定することで2次元電子系の電気化学ポテンシャルを測定することができるが、その結果シュブニコフ・ド・ハース振動を確認した。SET近傍のゲート電極に負電圧を与えることでエッジ状態とSETの距離を変化させることのできる構造を作成した。6 T ($1 < \nu < 2$) の磁場中でゲート電圧を変化させながらクーロン振動を測定することで、圧縮性-非圧縮性-圧縮性という $\nu=1$ のエッジ状態を確認できた。分数量子ホール状態での測定を行うことが今後の課題である。

多層量子ホール系の非線形伝導

東大物性研 川村 稔

遠藤 彰

東大物性研・CREST 勝本 信吾

家 泰弘

量子ホール状態にある2次元電子系を積層させた多層量子ホール系では、各層のエッジ状態が結合して、試料表面に特異な金属的な状態（カイラル表面状態）が存在することが理論的に予測されている。半導体超格子を用い、それぞれの井戸層が量子ホール状態になる磁場中で超格子の積層方向の電気伝導を測定することで、量子ホール状態にある2次元電子層間の伝導を実験的に調べた。

MBE成長したGaAs/AlGaAs半導体超格子（100層）をリソグラフィによって断面積の異なるメサ状に加工し、垂直伝導の測定を行った。 $\nu=2$ での面間コンダクタンス G_{zz} は、温度を下げていくに従い熱活性型で減少し、100 mK以下で飽和する。高温側での G_{zz} はメサの断面積に比例するが、低温での飽和した値は試料の周長に比例し、低温でのコンダクタンスは試料表面のカイラル表面状態が支配的であることが示唆される。 $\nu=1$ でも同様な結果が得られている。

低温のカイラル表面状態が支配的であると考えられる領域で、電流-電圧特性が顕著な非線形性を示すことを観測した。微分コンダクタンスは、低電圧側では試料の周長でスケールするが、ある電圧をを越える面積でスケールする。

Electron Transport in a Two-Dimensional Electron Gas at GaAs/AlGaAs
Heterointerface under a spatially modulated magnetic field

東大物性研 加藤 真由美

遠藤 彰

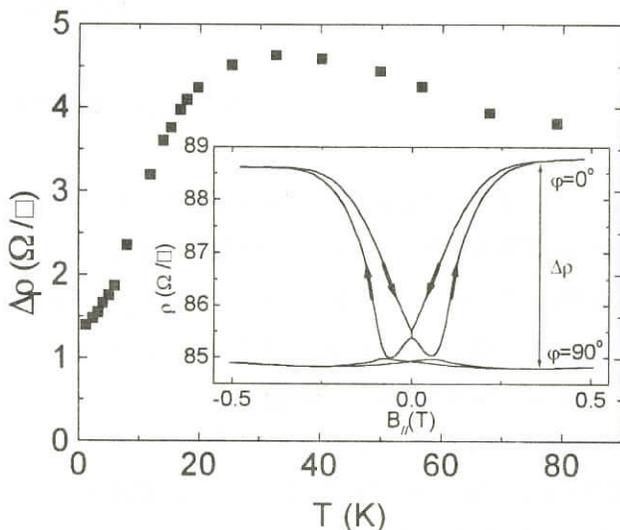
東大物性研・CREST 勝本 信吾

家 泰弘

我々はGaAs/AlGaAs単一ヘテロ界面2次元電子系試料表面にすだれ状磁性体(Ni,Co)金属ゲートをのせることで、周期的な磁場変調下の2次元電子系を実現している。

今回、変調磁場のみによる電気抵抗の変化を調べた。図のインセットは平行磁場 B_{\parallel} による抵抗の変化を示したもので、 $\Delta\rho$ は磁場変調による抵抗の増加分である。この $\Delta\rho$ の温度変化を測定したところメインパネルのように $\Delta\rho = \alpha + \beta T^2$ という $e-e$ 散乱特有の T^2 の温度依存性を観測した。これは周期的な磁場変調が加わったことにより $e-e$ 散乱による運動量の緩和が起こったためである

と考えられる。更に温度を一定にしたところで $\Delta\rho \propto \cos^2\phi \propto B_0^2$ という依存性を観測しており、 $e-e$ 散乱の確率 $1/\tau_{e-e}$ が磁場変調の振幅 B_0 の二乗に従うことが確認された。



ランダム磁場中の2次元電子の電気伝導

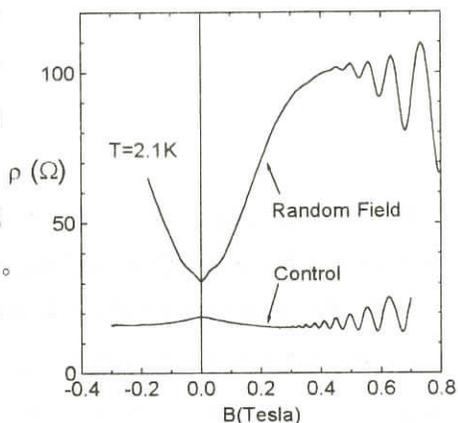
東大物性研 安藤 正人

遠藤 彰

東大物性研・CREST 勝本 信吾

家 泰弘

ランダム磁場中の2次元系は half-filled Landau level との関連、非局在状態の有無などの観点から関心がもたれている。GaAs/GaAlAs 2次元電子系の表面に微細加工によって磁性体を乱雑に配置した試料を作成した。2次元面内に磁場をかけてこれを磁化させることによって2次元電子はゼロ平均のランダム磁場を感じる。このとき2次元電子の抵抗は増加し、その増分は磁場変調の振幅の2乗にほぼ比例した。次にこの状態で2次元面に垂直方向の磁場に対する磁気抵抗を測定したところ、大きな正の磁気抵抗を観測した。いくつかの2次元電子系において $\nu=1/2$ の周りで報告されている磁気抵抗と似た振る舞いを示す。



チェッカーボード磁場中の超伝導ネットワーク

東大物性研 伊藤 優

安藤 正人

東大物性研・CREST 勝本 信吾

家 泰弘

磁束の量子化を反映した現象の一つとして、超伝導リングあるいはネットワークの基底状態エネルギーが磁場の関数として振動的に変化するLittle-Parks振動が良く知られている。超伝導ネットワークが示すLittle-Parks振動の1周期にはさらに微細構造がある。例えば正方格子の場合、単位格子あたりの磁束量子の数（しばしばこれをfrustration parameter α と呼ぶ）が $1/2$, $1/3$, $1/4$ などのところで、磁束の整合配置に対応するエネルギー極小が起こる。これは2次元タイトバインディング正方格子に磁場をかけたときのHofstadter butterflyと呼ばれるエネルギースペクトルの下端と対応している。今回われわれは、2次元正方格子の超伝導(Nb)ネットワークのボンド1つおきに微小強磁性体(Dy)を配した系を作成した。膜面に平行な磁場によって微小超伝導体を磁化すると、ネットワークの隣り合ったプラケットに逆向きの局所磁場がかかり、チェッカーボード状の磁場パターンが実現される。この系の超伝導転移直下における抵抗のLittle-Parks振動の様子をチェッカーボード磁場の振幅をパラメーターとして測定し、それがモデル計算で明らかにされたHofstadter butterflyの最低エネルギー準位をつないだ包絡線と良く対応することを見出した。

東工大・大学院総合理工 高 柳 邦 夫

物性研の柏移転を期として、今後10年の研究展望という位置づけで上記研究会を拝聴させていただきました。研究会では、「展望」について具体的な項目が提示されてはいなかったのですが、ナノスケールサイエンス関連の研究について講評させていただきます。

物性と電子・スピンの関わりがナノスケールでどのような形態で現れるのか？強相関が陽に現れるナノスケール系は見られるのか？という課題は、物性研が進められていこうとする方向に対して、極限物性部門・ナノスケール研究分野が貢献していく内容であると感じます。ナノスケール分野では、物性研の培ってきた低温技術が他の研究機関と比べて大きな研究の特色になっていると思います。この低温技術とナノスケール技術を合わせた先に、大きなブレイクスルーが期待されます。物性研には、“大きな”ブレイクスルーが期待されているわけですが、大きなブレイクスルーのためには方向をもった3年程の見えない努力が必要かと思えます。5年で芽が伸び始め、10年で華開けば良いという方向性が大切だと思います。このような長期的研究は、近年、推進にあたり多々難しい点があるわけですが、5年、10年経った後に、他の研究機関にはない多くの実績を残せるものと思えます。この観点から、極限部門のナノスケール分野が一丸となって進めていくための”目標点の提示”が期待されます。

一方、共同利用施設の充実という側面で感想を述べます。過去数年の間、表面科学やナノスケール部門では（その他の研究分野も同様と思いますが）、研究室単位で施設の充実がなされて来ました。しかし、施設の充実には既存（市販）の装置の購入が主たる内容であって、必ずしも装置開発能力や独創的研究装置（世界的に例を見ない）の開発が十分できたと言うわけでは無かったと思います。この間、国内の大学や研究所では、マシーンショッパや技術者が減少し、外国の一流研究所と比べたとき、開発技術力の差や継続的開発能力の差が目立って感じられるようになりました。民間の技術力だけに頼るのでは、最新の技術導入に対する研究が遅れるため外国に追いつけなくなりそうです。今、大切なのは研究者の独創的研究を継続的にサポートできる装置開発部門や“技術研究者”であると思います。共同利用装置の導入にあたっては、技術研究者という立場の人材を育てる仕組みを組み入れて頂くと、独創的研究をさらに推進できるものと思えます。

ナノスケール部門で、一台の大型装置を共通で使うというスタイルは定着していません。強磁場技術、極低温技術、超高真空技術、デバイス技術などは共有・共通した技術ですので、これらの共同施設が望まれるかと思えます。

物性研の益々の成果を期待申し上げます。

講 評

「量子輸送分野」に関して

東大・理 樽 茶 清 悟

物性研究所研究会シリーズの「表面・人工物質における物性科学のフロンティア」は、物性研究所の研究活動の詳細に加えて、所外の第一線の研究者の講演も多数聞くことができ、筆者にとって、当該分野の最先端の研究状況をまとめて認識することのできる良い機会であった。まず、このような有意義な研究会を企画していただいたことに感謝したい。

さて、「量子輸送」は、多彩な広がりを見せている研究分野であり、筆者自身とても全体をカバーできるとは思わないが、この研究会を通して抱いた物性研の研究活動に対する感想をまとめておきたい。とくに、筆者に関連する「量子輸送分野」の物性研の研究活動について、内外における位置付け、今後への期待などを中心に述べたい。

背景と位置付けについて：

量子輸送の研究は、この二十年程の間に、微細加工技術の開発によるメソスコピックなスケールの試料作製とそれを用いた様々な電気伝導現象の研究によって、急速に進展してきた。当初、電子の波としての干渉性は、固体の電気伝導における局在や揺らぎとして観測されていた。それが、メソスコピックなスケールの微細構造の開発によって、エネルギーの量子化や電子間相互作用との関わりを反映した形で、明らかに観測できるようになった。とくに、半導体の低次元電子系、超伝導微小接合、強磁性体ヘテロ構造など、次々と特徴豊かな微細構造が開発されたことが、量子輸送の研究に大きな進展をもたらしてきた。さらに、最近では、新しい材料として、カーボンナノチューブやフラレンなどのユニークな低次元構造、表面敏感走査顕微鏡技術を駆使して作られる原子鎖などの極限的な微細構造などが登場し、その技術分野は益々広がりつつある。加えて、量子計算の基本概念である量子コヒーレンスの制御、少数多体系の物理、量子輸送のダイナミクスといった、新しい物理の方向性も次々に登場するなど、量子輸送の研究は、次第に多くの科学、技術を巻き込んで、更なる発展を遂げようとしている。

これまでの経過を振り返れば、量子輸送の研究活動の特徴として、物理の理解と試料作製/測定の技術開発が常に平行して進められていること、及び、実験と理論が密接なかかわりをもっていること、が挙げられる。実際、世界有数の研究機関では、これらの特徴を兼ね備えた形で、積極的な研究活動を行っているグループが少なくない。一方、我が国では、研究者人口としては、諸外国に匹敵するものがあるが、その研究体制は必ずしも効果的とは言えない。大学には理論、実験とも個々には、優れた研究がなされているが、世界に向けてインパクトのある情報を発信するという点

では、その貢献は限られたものになっていると言わざるを得ない。これは、研究者個人の責任にもよるが、多分に、組織的な制約のために研究者が有機的に結びついた研究体制が出来難いことが問題になっていると思う。また、微細加工技術という点では、民間の研究機関の貢献が見逃せないが、一部の研究機関を除いては、デバイスへの指向性が強く、優れた技術がありながら、基礎研究の発展に繋がらない場合が多い。このような中で、最先端の研究を牽引しうる研究機関として、物性研究所に寄せる期待は大きい。理論、実験ともスタッフに恵まれていること、極低温、強磁場などの最先端の測定設備が充実していることなど、これほど条件的に整っている基礎研究の機関は数少ない。このような環境を生かして、これまで幾多の優れた研究が行われてきたことは、周知の事実であり、筆者はこれに苦言を呈するものではない。しいて勝手なことを言わせていただければ、理論と実験の緊密な協力のもとに今後の方向性を示すような研究活動を、より積極的に展開して欲しいと思う。これは、量子輸送の分野は、未だ物理的に未開拓な部分が多く残されていることから、物性研究所に我が国の基礎研究の牽引者としての役割を担って欲しいと思うが故である。

個々の研究活動について：

ここでは、家研究室、勝本研究室の研究活動を中心として、感想と今後の期待を述べたい。いずれの研究室でも、独自性に富み、質の高い研究が行われていることを、まず評価したい。両研究室では、密接な連携のもとに研究が行われている。家研究室では、二次元電子の磁気伝導、希薄磁性半導体の相転移と電気伝導などに着目した研究が行われている。二次元電子にポテンシャル変調を加える手法として、従来のゲート電圧による静電的変調ではなく、強磁性体を利用して微細な磁気的変調を加える方法を開発したことは、特筆に値する。短周期の磁気ポテンシャル変調構造では、磁気Weiss振動の観測、電子-電子散乱のより厳密な解明など、ランダムな磁気ポテンシャル変調構造では、複合フェルミエオンの研究の新しいアプローチなど、いずれも先駆的な研究がなされている。現在のところ、研究内容のほとんどは、古典的な描像に関係するものであるが、この先、量子輸送に直接関わる現象をねらうことによって、さらなる研究の進展を期待したい。また、希薄磁性半導体については、勝本研究室と共同で研究が進められている。磁気的秩序と電気伝導の関係を解き明かそうとする試みは、極めて斬新なものと言える。勝本研究室では、金属、超伝導体、半導体の微細構造を使って、干渉効果、単一電子帯電効果、量子コヒーレンス等の物理に焦点を当てた研究が行われている。ハイゼンベルグの不確定性原理、単一電子トンネルと位相コヒーレンスの関係など、量子輸送の本質を突いた実験が行われている。メゾスコピック構造を巧みに利用して量子力学の基本的課題を解き明かそうとする試みは、この分野の将来の研究の方向性を示唆するものとして意義深い。ただ、この種類の研究は、ややもすると単発的な研究に終止することが多いので、今後も挑戦的な姿勢を維持して欲しいと思う。このほか、両研究室で特筆しておきたいことは、高品質の二次元電子構造を自ら結晶成長して作っていることである。この分野の研究では、高品質の試

料で初めて見えてくる物理が多い。それだけに、試料づくりに高度な技術が要求されるが、大学の研究室では、一般に、半導体の高品質な試料作りが難しい。両研究室は、不断の努力によってこの問題を克服しており、試料作製の技術をうまく生かすことで、研究の自由度が広がっているように思う。

このほか、量子輸送に関連して、ヘリウム液面上の二次元電子の物理（河野所員）の講演を聞いた。筆者が直接関与している分野ではないが、河野研究室で行われている、超流動ヘリウム3上の二次元電子のウイグナー結晶化の研究は、半導体中の二次元電子の物理と関連が深いと思う。ヘリウム上の二次元電子は、よりクリーンな相互作用系に位置付けられることから、強相関電子系の物理という観点に立てば、固体中の低次元電子の研究者にとって、物理を共有できる。しかし、実際には、ヘリウムと固体の低次元電子の研究者が、研究交流や討論をする場合は極めて少ないように思う。この意味でも、物性研究所を中心として、異なる分野の研究交流が積極的に行われることを期待したい。

講 評

「表面科学領域」

東大・理 塚 田 捷

初めに表面科学全体が現在どのような状況にあるのかについて概観し、その中で物性研の「表面科学領域」のアクティビティがどのように位置付けられるか、また我が国の表面科学コミュニティにとって物性研に期待したいことなどを述べてみたい。物性研の各表面研究グループの活動状況については、日頃から断片的には知っているが、本「表面・人工物質における物性科学のフロンティア」研究会でそれらをまとめた構想の中での位置づけとともに聞くことが出来たので、いっそう理解が深まった。さらに所外研究者からの講演も、我が国の表面科学の状況の一端を知るのに有効だった。以下はこれらの印象をもとに、まとめたものである。もとより表面科学の領域はきわめて広範であるから、筆者にとっても本当に全体を見通した話は至難の技であり、ここで述べる事は一私見にすぎないことをおことわりしておく。

講演要旨でも述べたが、精密科学としての表面科学の出発は1970年代になって超高真空実験装置の普及とともにようやく始まり、表面を探る各種の実験法が開発・普及した。密度汎関数法による第一原理計算も、この頃実用化に向けての努力が始まる。1970年代の後半から80年代にかけては、これらの実験・理論の両面からの表面研究の対象は、簡単な再構成構造や吸着機構の解明、およびごく単純な表面動力学の研究などに向けられていた。現時点で振り返れば、次の時代の大きなブレークスルーを模索する時代であった。走査トンネル顕微鏡の発明（1982年）は、表面構造と電子

状態との情報を原子尺度分解能で実空間で得ることを可能とし、表面研究に画期的な前進をもたらした。さらに走査トンネル分光，原子間力顕微鏡，近接場光学顕微鏡など，走査プローブ顕微鏡法と呼ばれる様々な関連手法の開発へと発展した。これらの実験手法は表面研究の対象を一挙に拡大し，ナノスケールで特徴をもつ表面構造を原子尺度で研究することを可能とした。また，プローブ探針による表面構造の制御，表面反応の誘導など人工的なナノ構造生成と，その機能開発という研究領域を生み出すことになる。これは表面科学の新しいパラダイムの誕生が，画期的な研究手法の導入によってもたらされた典型的な例と言えよう。伝統的な表面研究分野も，上に述べた走査プローブ顕微鏡や第3世代軌道放射光などの実験手段，第一原理計算などを中心とした計算物理の進歩とともに，現在，研究対象を格段に拡張深化し質的な転換を遂げようとしている。

表面研究は広範なフロンティアをもち，関連する科学，技術の分野は非常に多い。しかし，永年に涉って表面研究に携わってきたものからみると我が国では精密科学としての歴史はごく限られた分野を除いて浅く，物性物理の他分野に比べて基礎研究者の数は決して多く無い。最近では工学的な意味で応用に直接つながる研究に携わる研究者の数は増えているが，基礎を中心に据えた研究を行うグループの数は理論実験共に意外に少ない。これは我が国における表面研究のコミュニティの基盤が諸外国に比べて弱いことを意味している。このような状況を考えると，物性研の表面研究グループに期待することは，日本の表面基礎研究のコミュニティの中核になってほしいということである。そしてそのコミュニティの育成と発展に，大きな役割を積極的に果たして欲しいと思う。そのためには，表面研究における革新的なパラダイムを打ち立てるような画期的な研究を推進させることが最も有効である。現在，走査プローブ顕微鏡で切り開かれたナノ構造系の物理が急進展を見せているが，画期的なアイデアの提案はまだこれからであり，ナノ構造系の基本コンセプトもほとんど出されていないのではないかと思う。この意味で物性研の研究グループには小さなヒットを打ち続けることも必要だが，もっと腰を落着けたスケールの大きな野心的な研究をねらって欲しいとも思う。

さて，物性研究所の研究スタッフが行いつつある研究テーマについて，感想を述べよう。すでに述べたように表面研究の前線は非常にスペクトルが広い。そこで，この広い研究領域を全面的に守備範囲にするのは一研究所の限られたスタッフにとっては，必ずしも得策ではないであろう。物性物理学とは異なる角度の問題意識によって研究をすすめている，他の研究所や大学ないわけではない。物性研ならではの研究を期待する所以である。小森，吉信，長谷川の3所員が現在課題としているのは，従来型の表面の構造決定に終始するものではなく，走査プローブ顕微鏡の開いた新しいパラダイムであるナノ構造系や，これと関係する領域を，さらに飛躍的に拡大しようとするものとして受けとめられる。小森所員のグループでは表面上にデザインしたナノ構造で磁気的な性質と電子的な性質の絡みあう物理を探索しようとしている。鉄の原子細線での磁気量子伝導現象の成果も非常に興味深いものであり，これからの発展が大きく期待できるものである。吉信所員の目指す研

究は、分子と表面の複合系の生成と量子的な機能探索にあるようである。これは個々の分子を用いる量子デバイスの基礎としてもきわめて意義の大きな研究であり、表面研究はもちろんのこと、人工ナノ構造系の最重要課題とも言い得る。長谷川所員の研究は、原子尺度表面層における電子波の振る舞いや表面構造に支配されるミクロな量子伝導の探求など、表面研究の最も重要な前線を意欲的に開拓しようとしている。全体的な印象として物性研究所の表面研究の動向は、走査プローブ顕微鏡などを中心として拓かれつつある表面ナノ構造系の分野で、これまで手のつけられていない新しい方向を模索しているようである。このような方向は新しい世代に属する物性研の表面研究者が未知のパラダイムを探り、さらなるブレークスルーを実現するために、理にかなったものと言えよう。物性研究所の3つの表面研究グループが、スペクトルの広い表面研究全体のまったく違う分野に分散してしまうのではなく、極めて関連性の深い領域に守備範囲を隣り合わせていることは、有機的な協力研究の発展を十分に予期させるものである。

本研究会の後半では、量子輸送の分野からも多くの興味深い講演を聞いた。この分野で、物性研所員グループの研究内容は半導体メゾ構造、あるいはヘリウム液面上の2次元電子系の物理、単電子トンネル系などである。この領域の研究は筆者の専門ではないから講評は差し控えるが、それらの内容は上に述べてきた表面／ナノ構造系の分野とは、極めて近い関係にあることを実感した。対象とする系やアプローチは少し異なるが、物理の問題としては共通の部分が多く、相互のアイデアの交換と討論によって、物性研ならではの革新的な方向が切り開かれるのではなかろうか？物性研の表面研究グループがこのような近接領域との絶えざる交流や、協力研究を積極的に推進するメリットは大きいと感じた。

表面やナノ構造と関連した提案型公募研究やCOEによる重点研究が、物性研究所以外の少なからぬ研究グループで現在進行中であることも事実である。しかし、それらには短期的なミッションに引きづられ目に見える成果をだすという条件に束縛されている。したがって、基礎科学の観点からの本当に興味深い問題を十分に思う存分発展させる自由度は、それほど豊ではないのではなかろうか？これらと比べると、物性研究所で表面の基礎研究に腰を据えた野心的な研究に取り込むことは極めて有意義なことと言える。表面研究に携わる物性研所員は比較的若い世代に属しているので、これから大きな研究構想をのびのびと実現していくには、もっとも相応しい環境なのではなかろうか？所外の一研究者として、様々な意味でのこれからの物性研における表面研究の発展を、大きな期待をもって見守りたいと思っている。

物性研の先端領域部門に期待すること

東大・工 永長直人

11月10日、11日の2日間の物性研研究会「表面・人工物質における物性科学のフロンティア」に出席して多くの御講演を聞き、私なりに考えたことを「評価」などという固い話でなく随筆風に書いてみたいと思います。

私の専門から離れた分野のお話も多かったので、むしろ「素人の素直な感想」と考えて参考にして下されば幸いです。

元来、物質には必ず表面や界面が存在するわけで、半導体素子の歴史を紐解いてもそれが死命を決していたことは周知の事実ですが、これからは表面や人工物質の研究意義を世に主張するために、「そこでしかできない」ことを示す必要があると思われます。その際に誰でも考えつくキーワードは「次元性」で、2次元、1次元、0次元の系をコントロールした形で作ることが出来れば、開拓できる物理現象は無限であると言えます。もちろん量子ホール効果はその代表例です。

実際に、この研究会でも半導体(主にGaAs)を基板にした微細加工技術によって量子細線を作り1次元の非フェルミ流体を実現するとか、周期的に磁場を印加することでウムクラップ散乱を起こして電気抵抗を測定するなどの素晴らしい実験が報告されました。低次元では電子間の相互作用と広い意味での電子-格子相互作用が3次元よりも重要となりますから、単純化された理想的状態でこれらの相互作用の効果を調べることは酸化物などの強相関電子系の物理へのインパクトも期待される有望な方向性だと思います。フラストレートした格子を作るとか、ハバードモデルを半導体上でシュミレートするとか、夢が広がります。液体ヘリウム表面も魅力的な系です。

特に³Heの超流動相は、対称性の破れ、それに伴う各種のtexture、トポロジーなど豊富な現象の宝庫です。その上に乗った電子はこれらの構造を感じながら運動するわけで、ちょうどスピンの環境中を運動する正孔というhigh-Tcの問題とも一脈通じるところがあります。物性物理の根幹に直接切り込まれる可能性を秘めた系であると思いました。後は電子の量子性をいかに顕在化させるかが勝負どころでしょう。

これらの系での物性研の研究は単に「量子力学を検証する」ということにとどまらずに、相互作用を意識した新しい現象の開拓まで視野に入っていて、オリジナリティーも精緻さにおいても世界のトップレベルにあると感じました。

一方で、表面/界面における電子状態、磁性、化学も重要なテーマです。BEEMによってショットキーバリアが直接見えるようになったことなど私には新鮮な驚きでした。半導体の教科書に書いてあるようなことが、実際に観測したり制御できるとなると新しい可能性が開けて来ると思っています。化学反応という観点からも表面は触媒現象と関連して研究は続行されるべきですが、研究

の歴史が古い分野だけに斬新なアイデアと切り口が要求されるでしょう。表面磁性に関しても、一方でペロブスカイトの超格子構造が実現し始め、金森則が実証されるに至った今日、物性研独自の方向性を打ち出す必要性が強まっていると考えられます。

このことと関連して、私見を述べさせていただくと、

(i) 統計力学的もしくは現象論的な視点

(ii) 非平衡系ダイナミクスという視点

がもっと導入されても良いと思います。

例えば(i)の例としてはテラスの統計力学やWetting転移、(ii)の例としては結晶成長などが挙げられます。ミクロな化学結合の様子などを調べることももちろん重要ですが、それだけでは上のような視点は出て来ないでしょう。粗視化したスケールで物事を考える人が一人居るだけで、物性研の表面研究は幅と奥行きを増すのではないのでしょうか。

以上、とりとめもなく書きましたが、個人的には物性物理は確実に多体問題中心へのシフトが起こりつつあると思います。表面、人工物質の研究にも一早くその視点を導入することが必要だと思いますし、私自身も強相関電子系の次のフロンティアはそこにあると感じています。それから、物性研のそれぞれの研究室はきわめて勤勉に、高い技術で質の良い仕事しておられ、文句のつけようがないわけですが、逆に伸び伸びと「物議をかます」ような仕事もして欲しいと思います。私達物性研の外の人々にもそういう研究をencourageする建設的な態度が必要だと考えます。

物性研究所短期研究会報告

“多自由度系の運動と摩擦の物理”

日時：1999年11月17日-19日

場所：物性研究所講義室

世話人 松川 宏（大阪大学大学院理学研究科）
三本木 孝（北海道大学大学院理学研究科）
川端 和重（北海道大学大学院理学研究科）
高山 一（東京大学物性研究所）
河野 公俊（東京大学物性研究所）
鈴木 敬愛（東京大学生産技術研究所）
塚田 捷（東京大学大学院理学研究科）
宮下 精二（東京大学大学院工学研究科）
前田 京剛（東京大学大学院総合文化研究科）
鈴木 勝（電気通信大学電気通信学部）
石渡 信一（早稲田大学理工学部）
白濱 圭也（慶應義塾大学理工学部）

内部に多くの自由度を持つ巨視的な系に外力を加えた場合、その内部自由度の再構築や境界面を通じた外部自由度との相互作用により、広義の摩擦を伴う複雑な運動を示すことがある。このダイナミクスに関係する現象は以下にその一部を記すように、典型的物性科学分野から、生命科学・工学まで広いスケールに渡る様々な分野に数多く存在する。

- i) 2つの固体界面間の滑り摩擦
- ii) 電荷・スピン密度波、ウィグナー結晶、磁束格子、ジョセフソン格子の位相の運動
- iii) 磁性体、誘電体等の様々なドメイン壁の運動
- iv) 双晶境界、転位の運動など塑性変形に関係した運動
- v) 地震
- vi) 分子モーター、細胞運動

これらの間には共通する現象、概念も多い。しかし、これまで実験研究者と理論研究者が集まり、これらの現象を包括的に議論する場は我が国はもとより諸外国においても無かった。また、このダ

イナミクス理解には、非局所性、非平衡性、非線形性、乱雑性を含んだ新たな概念の構築が必要であり、その研究は新たな物理学の重要な基本概念を提供するものと期待される。

本研究会は、上記の分野間の交流を深め研究の一層の発展を図るとともに、物理学、物質科学の新しい概念、分野の誕生のきっかけとなることを目指して、1999年11月17日-19日の3日間に渡って行われた。このような研究会は全く初めてのものだったにも関わらず、多くの講演、参加申し込みを頂き、連日、80名近い参加者によって朝9時より夕方6時近くまで活発な議論が行われた。このような場が望まれていたからであろう。今後とも継続してこのような機会を作っていきたいと考えている。

プログラム

11月17日

opening, CDW, SDW, Wigner Crystal

9:00 - 9:20 松川 宏 阪大院理

はじめに - 摩擦の多様性, 階層性, 類似性 -

9:20 - 10:05 P.Monceau CNRS Grenoble

Charge density wave: an example for driven periodic systems with quenched disorder

10:05 - 10:35 白濱 圭也 慶大理工

液体ヘリウム表面上ウィグナー結晶のダイナミクス

10:35 - 10:50 休憩

10:50 - 11:10 栗田 亮 北陸先端大

FET 構造における電荷密度波の電流変調

11:10 - 11:30 丹田 聡 北大院工

リング状の電荷密度波物質の創製とその物性

11:30 - 11:45 松田 健一 北大院工

Possibility of a dynamical phase transition in sliding

Charge - Density waves

11:45 - 12:05 久保田 弘 熊大院自然

ナノスケールCDWの動特性

- 12:05 - 12:20 佐々木 実 広大院先端
量子ホール状態における電荷密度波の並進運動の異常
- 12:20 - 12:35 長澤 光晴 東京電機大工
(TMTSF)₂Xにおけるスピン密度波の並進運動

Vortex

- 1:40 - 2:25 前田 京剛 東大院総合
超伝導体における磁束格子のダイナミクス：
場所分解磁束密度揺らぎ測定による動的相図の探求
- 2:25 - 2:40 戸川 欣彦 東大院総合
超伝導体における磁束格子のダイナミクス：
伝導ノイズ測定による動的磁束の再秩序化の観測
- 2:40 - 2:55 菅野 量子 日立基礎研
ピン止めされた磁束格子の相転移：コンピュータ・シミュレーション
- 2:55 - 3:10 松田 祐司 東大物性研
ブラッグガラス、渦糸ガラスにおける超伝導層間位相コヒーレンス
- 3:10 - 3:30 休憩

pinning, etc

- 3:30 - 4:00 明楽 浩史 北大院工
ジョセフソン接合系における位相のダイナミクス
- 4:00 - 4:20 林 正彦 東北大院情報
電荷密度波のdislocationの運動とspectral flow
- 4:20 - 4:40 湯本 正典 阪大院理
電荷密度波のピン止めと不純物効果
- 4:40 - 5:00 吉野 元 東大物性研
ランダムにピン止めされた弾性系におけるdropletの励起と緩和ダイナミックス
- 5:00 - 5:20 押川 正毅 東工大
量子ブラウン運動と共形場理論
- 5:20 - 5:35 西口 規彦 北大院工
金属クラスターネットワークの電気伝導特性への動力学的効果

5:35 - 5:50 小矢野 幹夫 北陸先端大
層状磁性体におけるスピンのスローダイナミクス

11月18日

ドメインウォールI

9:00 - 9:45 石橋 善弘 愛知淑徳大
強誘電体・強弾性体のドメインウォール

9:45 - 10:05 川端 和重 北大院理
双晶境界の断続運動

10:05 - 10:25 休憩

転位

10:25 - 11:00 鈴木 敬愛 東大生産研
理想的摩擦実験

11:00 - 11:30 小泉 大一 明大理工
転位の運動における摩擦

11:30 - 11:50 三浦 裕一 名大院理
量子固体ヘリウム3における転位の量子的運動

界面摩擦

1:00 - 1:40 笹田 直 千葉工業大
2つの固体界面間の滑り摩擦 - その認識の歴史 -

1:40 - 2:20 河野 彰夫 理研
分子間力の直接測定と摩擦現象への応用

2:20 - 3:00 塚田 捷 東大院理
表面における摩擦と散逸の素過程 - 吸脱着と原子間力顕微鏡 -

3:00 - 3:20 平野 元久 NTT
摩擦の原子論: 摩擦と超潤滑

3:20 - 3:40 休憩

- 3:40 - 4:10 鈴木 勝 電通大電通
吸着膜の摩擦とスリップ現象
- 4:10 - 4:25 檜枝 光憲 電通大量子
2次元メゾポーラス物質ヘクトライト上に吸着したヘリウム膜のスリップ現象
- 4:25 - 4:45 関本 謙 京大基研
Energetics of the fluctuating world
- 4:45 - 5:05 大園 拓哉, 藤平 正道 東工大生命理工
有機薄膜の摩擦力顕微鏡の特性
- 5:05 - 5:25 川口 高明 島根大教育
弾性格子のスライディング摩擦と特異なピン止め
- 5:25 - 5:45 原岡 和生, 林 啓治 金沢工大
分子動力学法を用いた弾性接触動摩擦現象の解析

6:20 懇親会

11月19日

粉体

- 9:00 - 9:45 那須野 悟 九工大工
粉粒体の運動と摩擦
- 9:45 - 10:05 早川 尚男 京大院人環
粉体の流れ及び摩擦の理論とシミュレーション
- 10:05 - 10:25 佐藤 勝彦 土井プロジェクト
確率的なスリップモデル

10:25 - 10:45 休憩

地震

- 10:45 - 11:30 平田 隆幸 福井大工
すべりの多体 disk 模型 - 介在物があるすべり現象
- 11:30 - 11:50 前田 亟 北大院理
多重Rayleigh振動子系と地震

生体

- 1:00 - 1:40 石渡 信一 早大理工
生体運動を担う分子モーターの仕組み
- 1:40 - 2:10 太和田 勝久 九大院理
タンパク質分子モーターの滑り速度とタンパク質分子摩擦
- 2:10 - 2:30 上村 慎治 東大院総合
べん毛運動とダイニン・チューブリン系化学力学結合
- 2:30 - 2:50 須田 斎 東海大開発工
モーター分子における摩擦論
- 2:50 - 3:10 金田 亮 東北大院工
熱ラチェットの対称性と流れが発生する条件
- 3:10 - 3:25 芳賀 永 北大院理
生体細胞の形態変化と運動に伴う力学特性
- 3:25 - 3:45 休憩

ドメインウォールと量子効果

- 3:45 - 4:30 宮下 精二 東大院工
磁性体のドメインウォールの運動と量子効果
- 4:30 - 4:50 柴田 絢也 東北大院理
メゾスコピック強磁性体における自由磁壁の量子力学
- 4:50 - 5:10 山中 雅則 東理大理
量子力学的な磁壁と電気抵抗
- 5:10 - 5:30 加藤 岳生 東大物性研
ジョセフソン接合における量子効果と摩擦

ISSP Workshop “Physics on Friction and Dynamics of Systems with Many Degrees of Freedom”

Nov. 17 - 19 Institute for Solid State Physics, University of Tokyo

Nov. 17

Opening, CDW, SDW, Wigner Crystal

- 9:00 - 9:20 H. Matsukawa Dep. of Phys., Osaka Univ.
Variety, hierarchy and similarity of friction
- 9:20 - 10:05 P. Monceau CNRS Grenoble
Charge density wave: an example for driven periodic systems with quenched disorder
- 10:05 - 10:35 Keiya Shirahama Dep. of Phys., Keio Univ.
Dynamics of the Wigner Solid on Liquid Helium
- 10:35 - 10:50 coffee break
- 10:50 - 11:10 Ryo Kurita Jpn. Adv. Inst. of Sci. and Tech.,
Current Modulation of Charge - Density - Wave with Field - Effect Transistor Structure
- 11:10 - 11:30 S. Tanda Dept. of Appl. Phys., Hokkaido Univ.
A new formation of rings of MX_3 single crystals and CDW - sliding along the circumference
- 11:30 - 11:45 K. Matsuda, S. Tanda, and K. Yamaya Dept. of Appl. Phys., Hokkaido Univ.
Possibility of a dynamical phase transition in sliding Charge - Density waves
- 11:45 - 12:05 H. Kubota Grad. Sch. of Sci. and Tech., Kumamoto Univ.
Dynamical properties of nanoscale CDW
- 12:05 - 12:20 M. Sasaki, M. Inoue Grad. Sch. of Adv. Sci. of Matter, Hiroshima Univ.
Anomalous CDW sliding motion in quantum Hall states
- 12:20 - 12:35 M. Nagasawa Natural Sci., Tokyo Denki Univ.
Sliding motion of SDW in $(\text{TMTSF})_2\text{X}$

Vortex

- 1:40 - 2:25 Atsutaka Maede Dep. of Basic Sci., Univ. of Tokyo,
Dynamics of vortices in superconductors - study of dynamical phase
diagram by location sensitive vortex - density - noise measurement -
- 2:25 - 2:40 Yoshihiko Togawa Dep. of Basic Sci., Univ. of Tokyo,
Dynamic of vortex lattice in superconductors - reordering observed by
conduction noise measurement -
- 2:40 - 2:55 Ryoko Sugano Adv. Res. Lab., Hitachi, Ltd.
Two-Stage Melting of Disordered Vortex Lattice in a BSCCO model
- 2:55 - 3:10 Y. Matsuda ISSP, Univ. of Tokyo
Phase Transition of Bragg-Glass in High-Tc Superconductors Proved by
Josephson Plasma Resonance
- 3:10 - 3:30 coffee break

Pinning, etc

- 3:30 - 4:00 Hiroshi Akera Dept. of Appl. Phys., Hokkaido Univ.
Dynamics of Phases in Systems of Josephson Junctions
- 4:00 - 4:20 M. Hayashi Grad. Sch. of Information Sci., Tohoku Univ.
Dynamics of Dislocation in Charge Density Waves and Spectral Flow
- 4:20 - 4:40 Masanori Yumoto Dept. of Phys., Osaka Univ.
Impurity Effects on Charge Density Wave Depinning
- 4:40 - 5:00 Hajime Yoshino ISSP, Univ of Tokyo
Droplet Excitations and Glassy Relaxational Dynamics of Elastic Systems
Collectively Pinned in Random Media.
- 5:00 - 5:20 M. Oshikawa Dep. of Phys., Tokyo Inst. of Tech.
Quantum Brownian motion and conformal field theory
- 5:20 - 5:35 Norihiko Nishiguchi Dep. of Appl. Phys., Hokkaido Univ.
Dynamic Effects on Electron Transport in Linked Metal Clusters
- 5:35 - 5:50 M. Koyano Jpn. Adv. Inst. of Sci. and Tech.
Slow spin dynamics in layered magnetic systems

Nov. 18

Domain wall I

- 9:00 - 9:45 Yoshihiro Ishibashi Aichi Shukutoku Univ.
Domain Walls in Ferroelectrics and Ferroelastics
- 9:45 - 10:05 Kazushige Kawabata Dep. of Phys., Hokkaido Univ.
Intermittent motion of isolated twin boundary

10:05 - 10:25 coffee break

Dislocation

- 10:25 - 11:00 Takayoshi Suzuki Inst. of Industrial Sci., Univ. of Tokyo
Ideal Measurement of Friction.
- 11:00 - 11:30 Hirokazu Koizumi Dep. of Phys., Meiji Univ.
Friction in dislocation motion
- 11:30 - 11:50 Yuichi Miura Dep. of Phys., Nagoya Univ.
Dislocation motion in quantum solid

Interfacial friction

- 1:00 - 1:40 Tadashi Sasada Chiba Inst. of Thchnology
Friction between solid surfaces - A history of its understanding -
- 1:40 - 2:20 Akio Kohno The Inst. of Phys. & Chem. Research(Riken)
History of direct measurement of molecular attraction of contact
bodies(adhesion), and the relationship between friction and adhesion
- 2:20 - 3:00 Masaru Tsukada Dep. of Phys., Univ. of Tokyo
Elementary Processes of Friction and Dissipation on Surfaces
Adsorption/Desorption and Atomic Force Microscopy -
- 3:00 - 3:20 Motohisa Hirano Nippon Telegraph and Telephone Corp.
Atomistic Friction: friction and superlubricity
- 3:20 - 3:40 coffee break
- 3:40 - 4:10 Masaru Suzuki Dept. of Appl. Phys. and Chem.,
Univ. of Electro-Communications

- Slippage of physisorbed films
- 4:10 - 4:25 Mitsunori Hieda Dept. of Appl. Phys. and Chem.,
Univ. of Electro - Communications
Slippage of physisorbed films:
Interfacial slippage of helium films on 2D mesoporous hectorite
- 4:25 - 4:45 Ken Sekimoto Yukawa Inst. for Theoretical Phys., Kyoto Univ.
Energetics of the fluctuating world
- 4:45 - 5:05 T. Ohzono, Masamichi Fujihira Dep. of Biomolecular Eng. Tokyo Inst.
of Tech.
Frictional force microscope on organic film
- 5:05 - 5:25 Takaaki Kawaguchi Faculty of Education, Shimane Univ.
Sliding friction and anomalous pinning in an elastic lattice system
- 5:25 - 5:45 Kazuo Haraoka, Keiji Hayashi(*) (*)Kanazawa Inst. of Tech.
A Molecular Dynamics Approach for the Low of Sliding Friction
- 6:20 Banquet

Nov. 19

Granular materials

- 9:00 - 9:45 S. Nasuno Kyushu Inst. of Tech.
Dynamics and friction of granular materials
- 9:45 - 10:05 H. Hayakawa Grad. Sch. of Human and Environmental Studies, Kyoto
Univ.
Theory and Simulation of Granular Frictions and their Flows
- 10:05 - 10:25 K. Sato Doi project
Stochastic slip model
- 10:25 - 10:45 coffee break

Earthquake

- 10:45 - 11:30 Takayuki Hirata Dep. of Human and Artificial Intelligent Systems,
Fukui Univ.
A Many - Body Disk Model of Slip Phenomena - Implication for boundary

friction including earthquakes -

- 11:30 - 11:50 Itaru Maeda Earth and Planetary Sci., Hokkaido Univ.
A system of Rayleigh oscillators and earthquake activities

Biological Systems

- 1:00 - 1:40 Shin'ichi Ishiwata Dep. of Phys., Waseda Univ.
Mechanism of Molecular Motors in Cell Motility
- 1:40 - 2:10 Katsuhisa Tawada Dep. of Biology, Kyushu Univ.
Protein friction as a factor limiting the velocity of sliding movement generated by protein motors.
- 2:10 - 2:30 S. Kamimura Dep. Life Sci, Grad. Sch. of Arts & Sci., Univ. of Tokyo
Eukaryotic flagellar motility: Mechanics and chemo - mechanical coupling.
- 2:30 - 2:50 Hitoshi Suda Dept. of Biological and High - Tech., Tokai Univ.
Friction theory in muscle contraction
- 2:50 - 3:10 Ryo Kanada Dep. of Appl. Phys., Tohoku Univ.
Symmetry of Thermal Ratchets and a Necessary Condition for Particle Flux
- 3:10 - 3:25 Hisashi Haga Division of Phys., Hokkaido University
Elastic Properties of Cell Motility and Morphology
- 3:25 - 3:45 coffee break

Domain wall and quantum effects

- 3:45 - 4:30 S. Miyashita Dep. of Appl. Phys., Univ. of Tokyo
Dynamics and quantum effects of magnetic domain walls
- 4:30 - 4:50 Junya Shibata Dep. of Phys., Tohoku Univ.
Macroscopic Quantum Dynamics of a Free Domain Wall in a Ferromagnet
- 4:50 - 5:10 Masanori Yamanaka Dep. of App. Phys., Sci. Univ. of Tokyo
Transport properties through quantum domain wall
- 5:10 - 5:30 T. Kato ISSP Univ. of Tokyo
Quantum effects and friction in Josephson junctions

はじめにー摩擦の多様性, 階層性, 類似性ー

大阪大学大学院理学研究科 松川 宏

複数の自由度を持つ系に外力を加えた場合、その内部自由度の変形や外部自由度等との相互作用により、広義の摩擦を伴う複雑な運動を示すことがある。これに関した現象は固体界面の滑り摩擦から摩擦力顕微鏡で調べられているようなミクロな摩擦、転位の運動などの塑性変形に関連したものの、電荷密度波、磁束格子など電子の巨視的凝縮相である種の秩序の運動、磁性体等のドメイン壁の運動、さらには地震や、分子モーターなど生体中の運動など広いスケールに渡っている。

これらの現象の中には階層構造をなしている現象もある。通常の機械的スケールの滑り摩擦の場合、界面の多数の凸凹の構造が重要な役割を果たし、多数の突起と他の物質との相互作用の結果生じる摩擦によって支配されるが、一つ一つの突起と他の物質との間の摩擦は、摩擦力顕微鏡で調べられているものである。岩石間の摩擦の理解が進めば、それは岩石を多数含んださらに巨視的な運動である地震の理解につながる。これらの階層構造は物質世界の階層構造がもとにあり現れるものであるが、マクロなスケールの現象での摩擦がよりミクロなスケールの摩擦により支配されるという意味で、“摩擦の階層性”ということが出来よう。他の科学の問題と同じく、ミクロな問題がわかったからといって、マクロな振る舞いがすぐわかるわけではないが、異なる階層の摩擦をつなげることにより、摩擦の理解が進むことは疑いが無からう。

摩擦はこのように非常に広いスケールにまたがる現象であるが、スケールが異なっても極めて似た振る舞いも多く存在する。運動を引き起こすためにあるしきい値以上の外力を加える必要があるという“静摩擦力”の存在は典型例である。この静摩擦力が現れる運動である電荷・スピン密度波、ウィグナー結晶、磁束格子、ドメイン壁、界面間のすべり等の運動は、ピン止めポテンシャル下の空間的に結合した多自由度のモデルとして表すことが可能である。また日常生活の摩擦でしばしば現れるスティクスリップ運動は、地震から、巨視的な界面の間に粉体を挟んだ系、さらには数10オングストロームの膜厚の潤滑剤を含んだ原子的に平らな界面間などにおいても見られる。これらの運動においては滑り運動する界面間の介在物（潤滑剤）の存在が重要な役割を果たしていると考えられ、類似したモデルで記述できる。

しかし、スティクスリップ運動といってもスリップが周期的に起こる場合もあれば地震のように確率的に起こる場合もある。その様な違いが何によってもたらされるのかは明らかではない。このように、類似の摩擦現象が全く異なる舞台上で起こる場合でも、そのより詳しい振る舞いは異なる場合があり、多くの場合、その違いの原因は不明である。その原因を明らかにすることは我々の摩擦への理解が進むということに他ならない。どのような場合に摩擦はどういう振る舞いをするか、その原因は何かを明らかにする摩擦現象の“ユニバーサリティクラス”の分類が必要であろう。そのような“ユニバーサリティクラス”を決めるものとしては、系の周期性の有無、乱れの有無、空間

及び系を記述する自由度の次元性, エネルギーが散逸する先の自由度の種類, 関与する変形は弾性か塑性か, 介在物の有無などが考えられる。また量子効果の有無なども関与してこよう。

摩擦のように幅の広い現象を対象とする研究の場合, “異なる階層の摩擦” を繋げるという観点と共に, 上記のような “ユニバーサリティクラス” の分類という観点も重要と考える。

Charge density wave: an example for driven periodic systems
with quenched disorder

Pierre Monceau

Centre de Recherches sur les Très Basses Températures, CNRS, France

First a very short review of the general properties of the collective transport induced by the charge (CDW)/spin (SDW) density wave motion in quasi-one dimensional conductors is presented. Then, I focus the attention on recent developments in this field.

Electronic instabilities which result in charge density wave (CDW) concomitant with a periodic lattice distortion, or in spin density wave (SDW) arise from the same basic driving force, namely a divergence in the generalized static electronic susceptibility $\chi(q)$. $\chi(q)$ is derived from the bare magnetic or electronic susceptibility of the conduction band:

$$\chi_o(q) \approx \sum n_k (1 - n_{k+q}) / (E_k - E_{k+q}) \quad (1)$$

where n_k the occupation of the state k and E_k its energy. The most significant contributions come from pairs of state which differ by $q=2k_F$ (k_F : the Fermivector) and have the same energy giving a divergent contribution to $\chi_o(q)$. This nesting condition is the best realized in one-dimensional compounds for which the Fermi surface is formed of two parallel planes separated by $2k_F$. Depending of the relative strength of electron-electron and electron-phonon interactions, the spatially modulated ground state can be either a CDW or a SDW.

In the case of a CDW instability¹ below the Peierls transition temperature T_p , the system is driven in a modulated state of the conduction electron density: $\rho(x) = \rho_o [1 + \cos(Qx +$

ϕ], accompanied by a periodic lattice distortion of the same wavelength, $2\pi/Q$, where $Q=2k_F$ is the modulation wave vector (generally incommensurate). The new periodicity opens a Fermi surface gap in the electron density of states and leads to the appearance of new satellite Bragg reflections.

The opening of a gap below the Peierls transition temperature is reminiscent of semiconductors, but the essential feature of a CDW is that its wavelength, $\lambda_{CDW}=2\pi/2k_F$, is controlled by the Fermi surface dimensions and is generally unrelated to the undistorted lattice periodicities, i.e., the CDW is incommensurate with the lattice. Consequently the crystal no longer has a translation group and in contrast to semiconductors, the phase ϕ of the lattice distortion is not fixed relative to the lattice but is able to slide along q . This CDW motion gives rise to a collective current given by $J=nev$, where n is of the order of the electron number density condensed in the band below the CDW gap. This Fröhlich mode is a direct consequence of translation invariance. In practice, as shown by Lee, Rice and Anderson², this translation invariance is broken because the phase, ϕ , can in fact be pinned to the lattice, for example, by impurities or by a long-period commensurability between the CDW wave-length and the lattice or by Coulomb interaction between adjacent chains. An applied dc electric field, however, can supply the CDW with an energy sufficient to overcome the pinning, so that above a threshold field, the CDW can slide and carry a current. Unfortunately, damping prevents superconductivity. This extra conductivity associated with the collective CDW motion, called Fröhlich conductivity, has been observed³ for the first time in 1976 and since that time, an intense experimental and theoretical activity has been devoted to the understanding of the properties of this collective transport model^{4,5}.

Non-linear transport properties have been observed in transition metal trichalcogenides as NbSe₃, TaS₃, halogenated transition metal tetrachalcogenides as (TaSe₄)₂I, (NbSe₄)₁₀I₃, in molybdenum oxide K_{0.3}MoO₃, etc. A similar behavior has also been found⁶ in SDW organic Bechgaard salts (TMTST)₂X.

The properties of the new current-carrying state can be summarized as follows:

- The dc electrical conductivity increases above a threshold field $E_T=R_I\tau$ (R : Ohmic resistance).
- The conductivity is strongly frequency-dependent in the range of 100 MHz to a few GHz.

- Above the threshold field, noise is generated in the crystal which can be analyzed as the combination of a periodic time dependent voltage and a broad noise following a $1/f$ variation.

- Interference effects occur between the ac voltage generated in the crystal in the non-linear state and an external rf field (Shapiro steps)

- Hysteresis and memory effects are observed, principally at low temperature. Inside a domain, where the phase ϕ is only time dependent, a simple equation of motion has been derived⁴:

$$\phi'' + \Gamma\phi' + \omega_p^2 \sin \phi = QeE/M^* \quad (2)$$

where E is the applied field, ω_p the pinning frequency and M^* the Fröhlich mass. For a dc field E higher than E_T , the $\sin \phi$ force term gives rise to a velocity modulation at a fundamental frequency, ν , and its harmonics which can be considered as the origin of the ac voltage generated in these systems. It has to be noted that the λ_{CDW} assumed periodicity for the force means that the fundamental frequency is linked to the mean CDW velocity $V_{CDW} = \lambda_{CDW} \nu$. Therefore, according to Eq.1, the extra-current carried by the CDW is given by:

$$J_{CDW} = n_{oe} V_{CDW} = n_{oe} \lambda_{CDW} \nu \quad (3)$$

According to Eq.3, the slope of J_{CDW}/ν is a measurement of the number of electrons condensed below the CDW gap. The extra-current J_{CDW} is measured from the non-linear $V(I)$ characteristics. The number of electrons deduced from the J_{CDW}/ν slope is of the order of the electron concentration in the bands affected by the CDW condensation, as it can be calculated from band structures or from chemical bonds. This result can be considered as proof of the Fröhlich conductivity⁷. When the field overcomes the threshold one, the electrons, which were trapped below the CDW gap, coherently participate in the electrical conductivity.

The general properties of the sliding CDW state are now relatively well established. New lines of research are being developed at the present time. I will describe some of them in the following.

1-Dynamical transition in sliding CDW

Non-equilibrium steady states of driven periodic systems with quenched disorder have recently arisen a large interest. Examples include quasi-1D charge-density wave (CDW)

(Ref.4,5), vortex lattices in type - II superconductors⁸, two - dimensional Wigner crystals⁹. All these systems are characterized by the pinning, so that a macroscopic motion is only set up when the applied force is larger, than a threshold value.

In the simple case of quasi - 1D CDW, where the CDW motion is only along the chain axis, many interesting effects were predicted such as a dynamical phase transition^{10,11} and instability due to the proliferation of phase slips¹¹. These results were obtained by solving the equation of motion of the periodic structure including non - equilibrium effects such as convective terms^{10,11,12}. Very recently Radzihovsky and Toner¹³ predicted the dramatic effect of the transverse current on the CDW motion along the conducting chains. This effect results in a novel "current - effect transistor" in which the CDW channel is turned on by a transverse quasiparticle current. An experimental verification of this effect was recently reported¹⁴. However in contrast to Ref.13 we found¹⁵ that contributions from transverse flows of electron - like and hole - like quasiparticles to the force exhibited by the CDW along the chains act in the opposite directions, so that in case of perfect electron - hole symmetry these contributions cancel each other like in the Hall effect. Considering also the recent experimental verification of the effect, we show¹⁵ that the influence of the transverse field on the longitudinal current was very likely provided by the action of a longitudinal current induced by the applied transverse voltage due to the large anisotropy of the CDW compounds.

2 - Phase slippage at the interface normal metal/sliding CDW

Phase slippage is required at the current electrodes of quasi - one dimensional conductors with a charge density wave (CDW) ground state for the conversion from free to condensed carriers. We have performed¹⁶ at the ESRF high resolution X - ray measurements of the spatially - varying shift $q(x)$ of the CDW satellite wavevector between current contacts on a thin NbSe₃ whisker in the sliding state. Applying direct currents, we observe at 90K a steep exponential decrease of the shift within a few hundred microns from the contact. The CDW deformation profile $q(x)$ reflects the carrier conversion process via nucleation and growth of phase - dislocation^{16,17}.

Pulsed current measurements of the shift q show important differences between pulsed and dc current data. While in the middle part of the sample there is no observed

difference between direct (dc) and pulsed (pc) currents, on the contrary the pc shift is nearly zero at the electrode position and reaches a maximum at a distance of about $100 \mu\text{m}$ away from the contact boundary. These differences suggest a spatially dependent relaxational behavior for the CDW deformations, the fastest relaxation occurring at the contact position. Keeping the pulse duration $T=90\text{K}$ for a current $I= 4.6\text{mA}$ ($2.3 I_T$) as a function of the pause, τ , between pulses. Figure 1 shows the variation of q with frequency $f=1/\tau$. For the highest frequency (5kHz) the shift reaches 70-80% of the (maximal) dc shift. At low frequencies(0.1Hz) q still has a finite value ($\sim 20\%$ of the maximal dc shift), which reveals frozen deformations in the CDW condensate.

3- CDW transport in mesoscopic structures of submicron and nanometer scale

We have studied CDW transport in the sliding state of NbSe_3 in different mesoscopic structures with size from micro to nanometer scale.

First, we show¹⁸ that the presence of columnar defects induce oscillations in the non-linear CDW conductivity as a function of magnetic field with flux period $hc/2e$. We consider this result as the collective response of the moving CDW to Aharonov - Bohm flux inside the columnar defects. Second, we demonstrate¹⁹ size effects on CDW transport in a periodic network of mesoscopic units between submicron holes (antidots). Size of the elementary unit can be as small as $0.5 \mu\text{m}$ along the chain axis and $0.2 \mu\text{m}$ times $0.3 \mu\text{m}$ in cross-section.

4- Slow dynamics of energy relaxation at very - low temperature in CDW/SDW compounds

CDW/SDW systems in their ground state exhibit typical “glassy behavior” for numerous electrical properties, the deep origin of the disorder being the pinning of the DW phase by randomly distributed impurities, lattice defects, or approach of the commensurability. This random ground state is characterized by many metastable states with very broad relaxation times spectrum.

These metastable states are best revealed by low-temperature thermodynamical measurements^{20,21}. By means of specific heat and energy relaxation techniques in the T

range between 70 mK and 10K, we have established several characteristic “glassy” properties:

- Additional excitations to regular phonons contribute to the specific heat for $T < 1\text{K}$ according to a T^ν law, $\nu < 1$.

- In the same T range, the specific heat becomes strongly time-dependent: the heat relaxation after a short heat perturbation of order of 1s becomes non-exponential. We have also shown that the relaxation kinetics depend strongly on the duration of the heat perturbation (“aging effect”). The time necessary to achieve thermodynamic equilibrium at $T < 1\text{K}$ exceeds hours. The heat relaxation is thermally activated with an activation energy depending on the duration of the perturbation. It is of the order of $\sim 1 - 2\text{K}$ if the system has reached its thermodynamical equilibrium.

The heat capacity in conditions of thermal equilibrium, C_{peq} (when aging is saturated) determined²² from the integration of the total energy release is strongly different from the short time C_p . That is demonstrated in Fig.3 for $(\text{TMTSF})_2\text{AsF}_6$. Below $T = 0.5\text{K}$, C_{peq} increases with decreasing T and reaches a maximum between 0.08K and 0.150K. This temperature dependence of C_{peq} has all the characteristics of a Schottky anomaly with a great similarity to that obtained in $(\text{TMTSF})_2\text{PF}_6$ as shown in the inset of for comparison.

A theoretical model²³, which ascribes the origin of the long-lived metastable states to strong pinning centers located close to commensurability regions could interpret the experimental features.

5 - Low frequency permittivity of CDW/SDW

The low frequency response of a pinned density wave (DW) [for instance, TaS_3 and the Bechgaard salt $(\text{TMTSF})_2\text{PF}_6$ in the temperature range between $T_p/2 < T < T_p$ is characterized by an overdamped and broad mode. The frequency dependences of the real part ε' and imaginary part ε'' of the dielectric susceptibility can be well described by a generalization of the Debye formulation taking into account a wide distribution of relaxation times. It is found that the mean relaxation time is thermally activated with activation energy roughly equal to that for free carrier conductivity, in agreement with linear response theory of weakly pinned elastic DW including screening effects of free electrons.

However, at lower temperatures, new features appear. We show that the temperature dependence of ϵ' measured at low frequencies, f , below 100 kHz exhibits a large peak. Similarly to many other disordered materials such as orientational glasses, spin glasses,....., the divergence of ϵ' may indicate a transition of the DW into a new glassy-like state^{24,25}. Such a glass-like state has also been revealed at very low temperature ($T < 1\text{K}$) where the energy relaxation time of DW excitations becomes anomalously large and dependent on the time duration of the application of the thermal perturbation^{20,21}.

In the sulfur analogues of the Bechgaard salts, $(\text{TMTTF})_2\text{X}$ with $\text{X} = \text{S}$ and PF_6 , charge localization of Mott-Hubbard type occur in the range of $T \simeq 100 - 200\text{K}$, leaving unaffected the spin degrees of freedom. It is shown that in the localized state the huge real part ϵ' of the dielectric permittivity (with a growth up to a magnitude of $10^5 - 10^6$) results from the collective response of a charge ordered state of a Wigner crystal due to long range intersite Coulomb interaction²⁶.

Acknowledgements

I am deeply indebted to my colleagues S.Artemenko, H.Berger, K.Biljakovic, S.Brazovskii, R.Currat, N.Kirova, O.Laborde, J.C.Lasjaunias, Yu.I.Latyshev, L.Levy, J.E.Lorenzo, F.Nad, P.Pannetier, H.Requardt, S.Zaitsev-Zotov for their active and stimulating collaboration.

References

- 1- H. Fröhlich, Proc. R. Soc. London, Ser.A 223 (1954) 296.
- 2- P.A. Lee, T.M. Rice, and P.W.Anderson, Solid State Commun. 14 (1974) 703.
- 3- P. Monceau et al, Phys. Rev. Lett. 37 (1976) 602.
- 4- For reviews: Electronic Properties in Inorganic Quasi - One Dimensional Compounds. Parts I and II, edited by P.Monceau, D.Reidel (Dordrecht, 1985).
- 5- Charge Density Wave in Solids, edited by L.P.Gor'kov and G.Grüner (1994).
- 6- M. Nagasawa, this workshop.
- 7- P. Monceau et al., Phys. Rev. Lett.45 (1980) 43.
- 8- G. Blatter et al., Rev. Mod. Phys. 66 (1994) 1125.

- 9- E.Y. Andrei et al., Phys. Rev. Lett. 60 (1988) 2765.
- 10- L. Balents and M.P.A.Fisher, Phys. Rev. Lett. 75 (1995) 4270.
- 11- L.W. Chen et al., Phys. Rev. B 54 (1996) 12798.
- 12- P. Le Doussal and Th.Giamarchi, Phys. Rev. Lett. 76 (1996) 3408; Phys. Rev.B 57 (1998) 11356
- 13- L. Radzikovsky and J.Toner, Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 3711.
- 14- N. Markovic et al., Phys. Rev. Lett. (2000).
- 15- S. Artemenko et al., preprint Cond. Mat./9910530.
- 16- H. Requardt et al., Phys. Rev. Lett. 80 (1998) 5631.
- 17- S. Brazovskii et al., Phys. Rev., in press.
- 18- Yu.Latyshev et al., Phys. Rev. Lett. 78 (1997) 919.
- 19- Yu.Latyshev et al., Eur. Phys. J.B3 (1998) 421; Synth. Metals 103 (1999) 2582.
- 20- K. Biljakovic et al., Phys. Rev. Lett. 62 (1989) 1512; 67 (1991) 1902.
- 21- J.C. Lasjaunias et al., Phys. Rev. B 53 (1996) 7699.
- 22- J.C. Lasjaunias et al., Eur. Phys. J.B 7 (1999) 541.
- 23- Yu.N. Ovchinnikov et al., Europhys. Lett. 34 (1996) 645.
- 24- F.Ya. Nad and P.Monceau, Phys. Rev. B 51 (1995) 2052.
- 25- F.Ya. Nad et al., Solid State Commun. 95 (1995) 655.
- 26- F.Ya. Nad et al., Eur. Phys. J.B3 (1998) 301; J. Physique IV (Colloques) Vol.9 (Dec.1999).

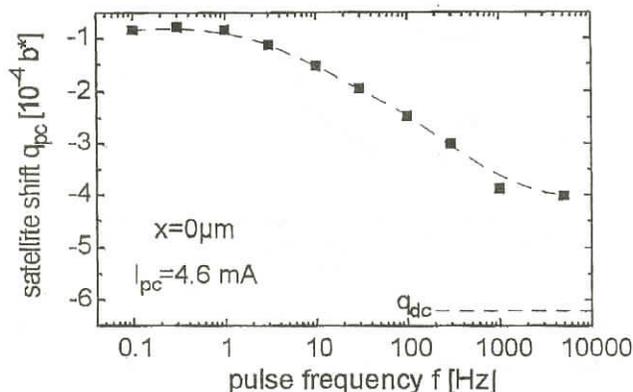


Fig1. Satellite shift q (in units of b^* at the contact boundary as a function of the frequency $f=1/\tau$, (τ : the time between pulsed currents ($I/I_T=2.13$)). The dashed line represents the q shift for dc current of the same intensity; $T=90K$ (from Ref. 17).

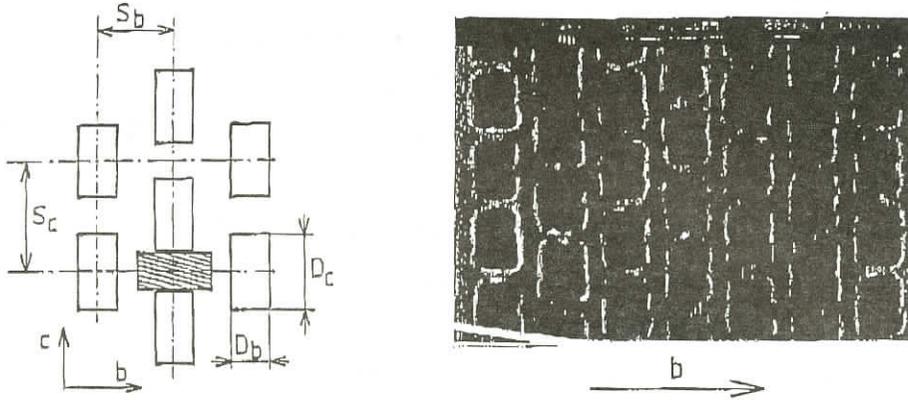


Fig2. a:schematic picture of a structure with a triangle lattice of holes (antidots). The chain axis is along b . Elementary CDW conducting unit is shown as the shaded rectangle. b:scanning electron micrograph of the patterned part of NbSe_3 : $S_b=S_c=0.6 \mu\text{m}$, $D_b=D_c=0.4 \mu\text{m}$ (from Ref. 19).

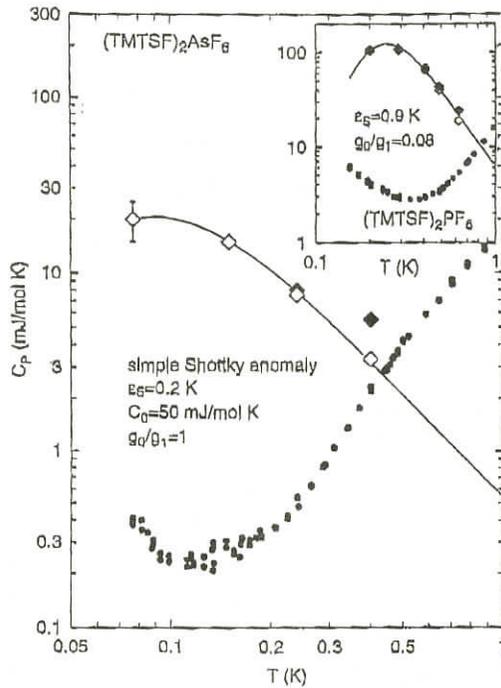


Fig.3. Specific heat of $(\text{TMTSF})_2\text{AsF}_6$ in thermodynamical equilibrium obtained by total integration (black dots) compared to the short-time C_p . The anomaly which remains after subtraction of the short time C_p (empty losange) can be fitted to the Schottky anomaly (full line) with the corresponding parameters given in the figure. Inset shows similar anomaly for $(\text{TMTSF})_2\text{PF}_6$; from Ref. 22.

液体ヘリウム表面上ウィグナー結晶のダイナミクス

慶應義塾大学理工学部物理学科 白濱圭也

液体ヘリウムの自由表面に形成される2次元電子系は100mK程度の低温で三角格子を組んだウィグナー結晶となる。電子が結晶化すると格子点に局在した電子が液面を下向きに押すために、電子は結晶と同じ周期の規則的な液面の凹み(Dimple)を伴う。液面の変形は表面波の量子、リップロンであり、周期的凹みは結晶の逆格子ベクトルの波数を持つリップロンの重ね合わせと考えると良い。ウィグナー結晶の電気伝導、すなわち水平方向へのダイナミクスは、電子結晶の集団運動とそれに伴うへこみの動きや変形が絡んだ興味深いものになると期待される。

我々はヘリウム4表面上結晶の磁場中の縦伝導度 σ_{xx} を測定し、 σ_{xx} が強い非線形性を持つことを見いだした(Shirahama and Kono, PRL **74**, 781 (1995))。入力電圧を上げてゆくと伝導度は電圧に比例して増加し、ある電圧で突然不連続に低下する。磁場中では縦の伝導度の低下は結晶電子の移動度の増加を意味し、電子はあるしきい入力電圧で動きやすくなる。しきい電圧は印可磁場、入力電圧周波数、電子密度などの実験パラメタに対しべき乗的依存性を持つ。

これらの非線形伝導は、結晶電子が液面の凹みを伴って運動することと密接な関係があると思われる。我々は観測された伝導度のジャンプが、電子の速度が増加するにつれ凹みが電子の運動に追従できなくなり、電子が凹みから飛び出してしまう、一種の「スライディング」現象によって起こると考え、凹みが作る剛体ポテンシャルの極小点が外場によって消失する点でスライディングが起こるとするモデルから、しきい電圧の種々の物理量へのべき依存性を系統的に説明することができた。

伝導度ジャンプが起こる電圧より低入力の領域では、伝導度は入力電圧にほぼ比例して増加する。DykmanとRuboはこの振る舞いが、へこみを伴った結晶の運動速度が結晶の逆格子ベクトルの波数のリップロンの位相速度を超えようとして、この波数のリップロンをコヒーレントに放出する、「リップロンのBragg-Cherenkov放射」が起こっているためであるという理論を提唱している。低電圧領域の非線形性からスライディング状態への転移の機構の解明が今後の大きな課題の一つである。

液体ヘリウム表面上ウィグナー結晶を「非線形多自由度系」と見た場合、なんといっても非常にきれいな系であることが特徴である。ヘリウム表面は滑らかで不純物は存在せず、結晶をピン止めする作りつけのポテンシャルは存在しない。従って電荷密度波や超伝導体の磁束格子とは極めて対照的な、ある意味で理想的な系と見ることもできる。しかし我々の実験結果からは、結晶電子のそれぞれが自分で作る液面の凹みに「ピン止め」されているという見方もできなくはない。液面の凹みというこの系固有の状況が新しい物理を生み出すことを期待したいが、実験結果の解釈には測定法に起因する電場の不均一さなどを考慮した詳細な考察が必要と思われる、そう簡単ではないだろう。我々は今後過渡現象などの様々な実験からこの系のダイナミクスを明らかにして行きたいと考えている。

北陸先端大 栗田 亮

電荷密度波(Charge - Density - Wave: CDW)物質である NbSe₃ をチャンネル層として用いた電界効果トランジスタ(Field - Effect Transistor: FET)が Adelman ら¹⁾によって作製され、その電気特性について研究された。このFETは、しきい電場以上の電界を印加することにより、ソース・ドレイン電極間において非線形伝導を示す。さらに、ゲート電圧の印加により非線形領域において電流変調が出現する。正のゲート電圧では、非線形電流が減少し、逆に負のゲート電圧では増加することが観測された。また、負のゲート電圧印加時における変調強度は正のゲート電圧印加時よりも大きく、ゲート電圧の極性に対して変調強度は非対称性を示す。しかしながら、チャンネル層のどの領域でどのようなメカニズムで電流変調が生じるのか明確にされていない。

我々は、電流変調のメカニズム解明を目的として研究を行なっている。我々は、AdelmanらのCDW FETの構造とは異なり、ゲート長、ソース・ゲート長、ゲート・ドレイン長を変化できるCDW FETの作製を行ない、電気特性の測定を行なった。

変調強度は、ゲート長が長くなるとともに増加し、ゲート長に依存しており、かつ、ソース・ゲート長、ゲート・ドレイン長にはほとんど依存しないことより、CDW FETにおいて観測される電流変調は、ゲート電極下でのみ生じていることが明らかになった。²⁾

CDW FETにおいて観測される非線形伝導が、CDWの並進運動により生じているのか明らかにされておらず、さらに、電流変調とCDWがどのような関係にあるのか明らかにされておらず興味を持たれている。そこで我々は、狭帯域雑音(Narrow Band Noise: NBN)測定を行なった。その結果我々は、CDW FETにおいて初めてNBNの観測に成功した。このことより、CDW FETにおいて観測される非線形伝導はCDWの並進運動により生じていることを明確にした。ゲート電圧印加によりCDWの並進運動がどのような影響を受けるのか明らかにするために、定電圧印加時におけるNBNの周波数のゲート電圧依存性について測定を行なった。その結果、正のゲート電圧ではNBNの周波数は低周波数側へ、逆に負のゲート電圧では高周波数側へシフトすることが観測された。このことは、NBNの周波数がCDW電流に対して比例することを考慮すると、正のゲート電圧では非線形電流の減少、逆に負のゲート電圧では増加することを意味しており、 $I-V$ 特性の結果と一致する。すなわち、CDW FETにおける電流変調はCDWの並進運動の速度変化により生じていることが明らかになった。

ゲート電圧印加により、NBNの周波数は複数のピークに分裂するのではなくピーク全体がシフトする。このことは、ゲート電極下全体において同一の速度変化が生じたことを意味している。すなわち、CDW FETにおける電流変調はゲート電極下全体において生じていることを明らかにした。

[1] T.L. Adelman et al., Phys. Rev. Lett. **74** (1995) 5264.

[2] R. Kurita et al., Physica **B284-288** (2000) (in Press).

リング状の電荷密度波物質の創製とその物性

北大院工 丹 田 聡
 川 本 温 子
 塩 原 正 人
 岡 島 吉 俊
 山 谷 和 彦

球面をもつフラレンやトーラス状カーボンチューブやDNAのように、半導体微細加工のような切ったり貼ったりする人工的技術を使わずに、自己集積的に自然にできあがるトポロジカルな物体の構造やそういった場で織りなす物性は、新しい量子効果やトポロジカルな効果（例えばBerry位相、多価関数性、トポロジカル不変量などが頭に出てくるような）が期待され大変興味深い。

一方、微小金属リングや巨視的波動関数で表される超伝導体のリング（この場合は大きさは問わない）で観測されている永久電流特性、量子力学的な干渉効果が、同じく巨視的波動関数をもつ電荷密度波（CDW）系において果たして存在するのか未解決の問題として注目される。Monceauらは重イオン照射によりランダムにサブミクロンの穴をあけたNbSe₃（一次元方向には垂直な穴）を用いてAB効果の実験を試みた。すべり伝導しているCDW状態での磁場による干渉効果が見られるけれども、高電場の実験の為、CDWが壊れた時に発生する準粒子によるAAS効果の可能性があり、CDWにAB効果があるという結論には達してはいない。CDWが一次元方向でリングを形成している理想的なサンプルができればAB効果に限らず期待される様々なCDWの量子干渉効果を直接確認できる可能性がある。

このような背景のもとにリング状のNbSe₃結晶を作成することを試みた。従来の製法（閉管気相成長）を工夫することによりリング状の結晶が作成することに成功した（図1 inset）。リングの径は300nmから500μmまで広領域にわたって存在する。X線回折法によりこのリング状結晶が単相のNbSe₃単結晶(P2₁/m)であることを確認した。電子線回折法によりこのリング状NbSe₃（50μmサンプル）においてCDW転移温度以下（T=138K）でBragg反射のほかに衛星反射が観測された（図2）。衛星反射の単位波数ベクトル Q₁ は（0 0.24 0）であることがわかった。これは、b軸つまり一次元方向（チェーン軸方向、この場合は円周方向に対応する）に静的周期的格子歪が発生しており確かにリング状結晶において長距離秩序のCDWが発生していることがわかった。リング構造になっていることによる新しい格子系の歪や分域構造の発生などはこのサンプルでは観測されな

かった。(小さい径のリングに関してはこの限りではないと考えられる。)

また、電氣的測定においては、リング状NbSe₃の抵抗率の温度依存性により、2度のT=140K, 60KでCDW転移を行うことがわかった(図1)。さらに、T=44.5KでCDWの並進運動に伴う非線型伝導(しきい電界値: 350mV/cm)が観測された。これらは従来のリボン状NbSe₃単結晶と定量的にも定性的にもほぼ同じでありリング全体にわたって均一にCDWになっていることを示している。以上の構造と電氣的測定の結果から自然界に従来のCDWとはトポロジーの異なるCDWリングが初めて存在することがわかった。

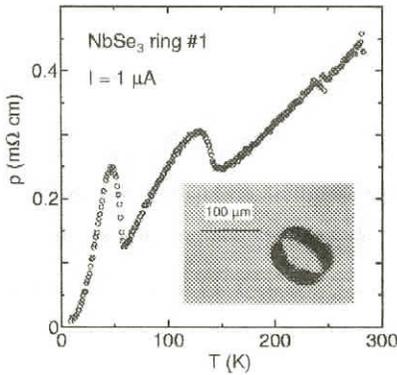


Fig. 1. Temperature dependence of resistivity of the ring-shaped crystal along the circumference of NbSe₃.

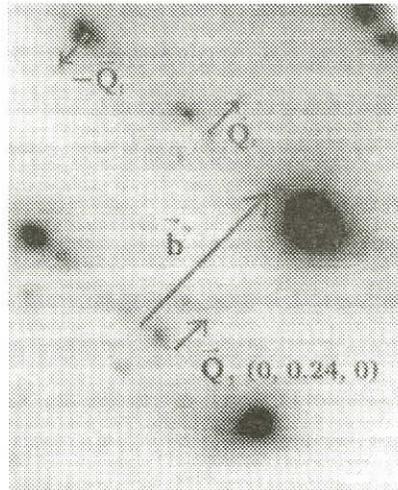


Fig. 2. Satellites of CDW of ring-NbSe₃ by electron diffraction at T=138K, which is cooled down below CDW transition temperature. $Q_1(0, 0.24, 0)$ is wave vector of the CDW, b^* the reciprocal lattice vector.

電荷密度波のスライディング状態における動的相転移の可能性

北海道大学大学院 工学研究科 量子物理工学 松田 健一
 丹 田 聡
 山 谷 和 彦

近年，“乱れ”の効果が多自由度系の動的性質にどのような変化をもたらすのかという問題が精力的に研究されている。なかでもそれがピン止めとして作用する場合，系に外部から加えられる駆動力の大きさによって，ある種の動的な相転移を生じるのではないかと考えられている。よく知られている例としては，砂山の雪崩現象などに代表されるデピンニングといわれる現象がある。さらに例えば第二種超伝導体中の磁束格子やウィグナー結晶，そして本研究のテーマである電荷密度波などの空間的な周期性を有する媒体においては，外部から加えられる駆動力(電流や電場)の大きさに応じてPlastic-Flow Phaseという塑性のある運動状態からMoving-Solid Phaseという元の空間的な対称性を回復した(正確には，空間的な対称性を反映した時間的秩序のあらわれる)状態へと移り変わることが示唆されている。

電荷密度波は低温で空間的に周期的な電荷の疎密を生じた基底状態であるが，内部変形の自由度や電荷密度波同士の相互作用，系に内在する不純物や格子欠陥によるピン止めの効果などによって多自由度系としての興味深い振る舞いを見せることでよく知られている。そこで我々はこの電荷密度波の動的な性質を調べることによって，前述のような動的な相転移が存在するのかということをおきらかにしようと試みた。実験には斜方晶 TaS_3 という擬一次元伝導体を用いた。

図1に示すのは液体窒素温度において得られた電流-電圧特性である。ただし横軸を，電荷密度波のデピンニングが生じるしきい電場 V_T によってスケールしている。この図からわかることは，電荷密度波のデピンニング電場近傍での振舞いが $I \sim (V - V_T)^2$ という巾乗則にしたがっている事である。また， V_T から更に電場を大きくしていくと，ある電場 V_c を境に急激に電流が増加している事もみてとれる。

次にこの V_c での変化がどのような事を意味しているのかということを知るために，電荷密度波の運動にともなって発生する電流振動のスペクトル強度を電場の関数として測定を行なった(図2)。その結果， V_c 近傍で振動スペクトルの強度が最小値をとるような結果を得た。

以上の結果は，電場の大きさにしたがって V_c の前後で電荷密度波のスライディング状態に急激な変化が生じている事を示しており，電荷密度波のスライディング状態においてPlastic-flow PhaseからMoving-Solid Phase へという動的相転移の存在を示唆する結果となった。

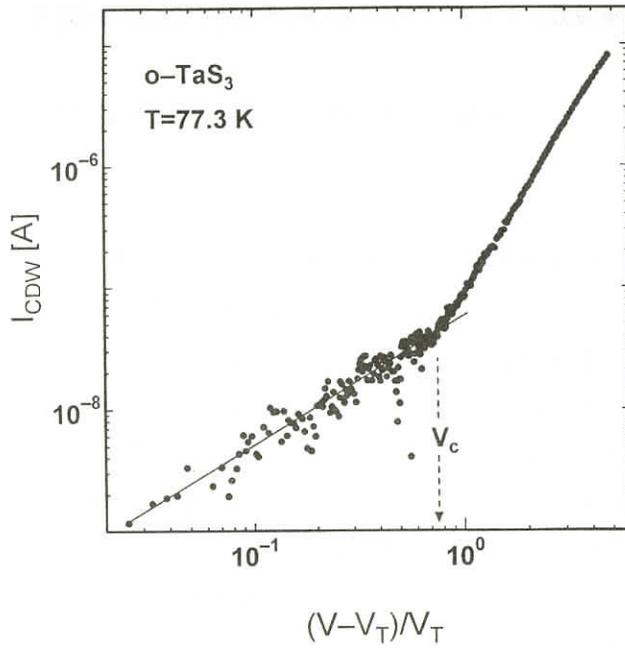


Figure 1.

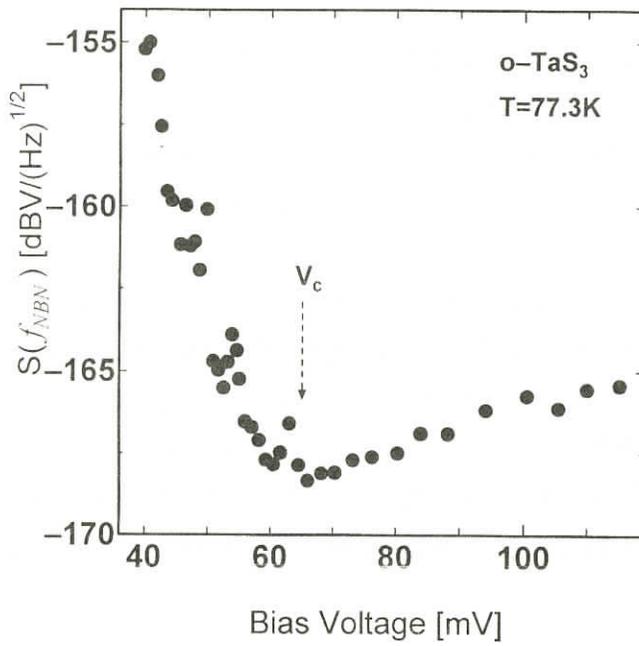


Figure 2

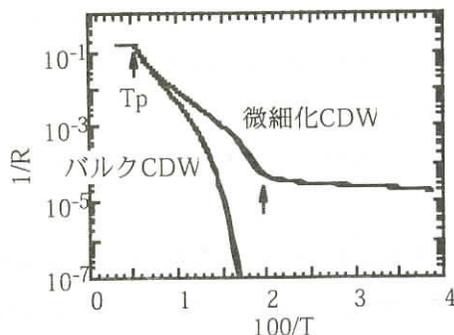
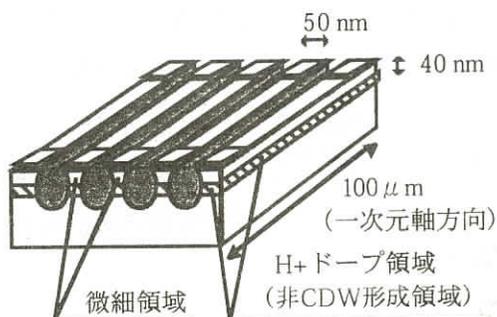
Dynamical properties of nanoscale CDW ナノスケールCDWの動特性

熊本大学大学院自然科学研究科 久保田 弘

一方向にのみ金属的な高伝導率を示す一次元伝導体は、極低温で金属-絶縁体転移を起こすとともに、電荷密度波 (Charge Density Wave : 以下, CDW) と呼ばれる新しい電流担体を励起する。このCDWは、有効質量が電子の数千倍にも及ぶ重い電子系でありながら量子効果が実現すると予想されている。CDWの本質的な一次元の伝導特性はこれまで、様々な要因によりいまだ実測されていないと考えられる。その要因として隣接するCDW間のクーロン相互作用、不純物によるピン止め、ノーマルキャリアの遮蔽効果などが指摘されている。そこで我々は真の一次元効果を際立たせるために、イオンビームによる微細加工技術を用い、CDWを一次元的に閉じ込めることで、隣接するCDW間のクーロン相互作用を抑制したナノスケール幅のCDWを励起し、その伝導特性を実験的に捉えた。

ナノスケールCDWの形成 一次元伝導体である $K_0.3MoO_3$ 試料を微細化するために、まず収束イオンビームを用いて一次元軸に沿ってシリコンイオンをライン状に照射し、強アルカリ溶液でエッチングする。これによりイオン照射部のみが増速エッチングされ、イオンによる照射欠陥分布で決定されるサイズの溝が形成される。次に、低エネルギーイオンビームを用いて水素イオンを試料表面より照射し、特定の深さに分布させることにより非CDW形成層を試料内部に形成する。この層により表面層がバルク試料より分断され、数十nm スケールの微細一次元伝導体が形成される。今回、この技法を用いて幅約50nm、厚さ約40nmの試料の作製に成功した。

ナノスケールCDWの伝導特性 試料の微細化前後におけるR-T特性は、微細化後においても180Kでの金属-絶縁体転移 T_p が確認され、伝導軸を破壊することなく微細化が行われていることが確認できた。転移後、試料は半導体的特性を示すが、微細化した試料では50K以下の低温で伝導率の温度依存性が鈍くなることが観測されている。またこの領域では、バイアスに対して負性抵抗が観測されている。



広大院先端 佐々木 実
井上 正

擬二次元伝導体 η - Mo_4O_{11} は、105 K(= T_{c1})と35 K(= T_{c2})で電荷密度波(CDW)転移を起こし、CDW相で特異な電子物性を示す興味深い物質系である。最近、この物質系で量子ホール効果(QHE)が起こることを無機物質で初めて見出した。¹⁾ このようなバルクな物質で起こるQHEの起源として、ランダウ量子化に伴う移動度ギャップの形成と、何らかの電荷移動(CT)によるフェルミエネルギー E_F のピン止めが考えられるが、どのようにしてCTが起こるのか不明であった。

本研究では、CDW系からQHE系へのCTが原因ならば、CDWの並進運動が量子ホール系により影響を受けるであろうという観点から、CDWの並進運動による非線形パルス電場応答²⁾を、QHE現象が観測される0.3 Kの低温で最大磁場10Tまで測定した。

Fig. 1は、0.3K(○)及び4.2K(実線)における非線形パルス電場応答による伝導率 σ の時間変化を2-10Tの磁場範囲について示したものである。ここでは、 σ の減少するCDWの変形過程は見られず、 σ の増加する並進過程のみが観測される。この過程は、図に示したように、緩和時間 τ_{CDW2} で特徴づけられる速い成分と τ_{CDW1} をもつ遅い成分よりなる。ただし、 τ_{CDW1} 及び τ_{CDW2} はそれぞれ第1 CDW相及び第2 CDW相で凝集したCDW1及びCDW2による並進運動の緩和時間である。その緩和時間 τ_{CDW2} の磁場依存性をFig. 2 (b)に示す(黒印: 0.3K, 白印: 4.2K)。特に0.3Kでは、ホール抵抗率 ρ_H がプラトーとなる磁場領域(Fig. 2 (a)参照)で τ_{CDW2} が増大する異常が見られる。この異常はQHE現象が見られなくなる4.2Kでは消失する。このように、CDW系とQHE系との相互作用を見出したのはこの系が初めてである。

上述のような現象は、次のように理解できる。この物質系は、第2 CDW相でもノーマルキャリアが残っており、幾つかの小さな電子・正孔ポケットが存在している。その一つが十分低温の強磁場下でランダウ量子化し、移動度ギャップが形成される。このようなQHE系へCDW2系からCTが起こり、フェルミエネルギーはピン止めされる。一方、CTによりCDW2系に電子欠陥が導入されるため、CDW2鎖間の電子遷移が促進され、CDW2凝縮は非圧縮性の剛体となり並進運動の緩和時間 τ_{CDW2} が増大する。

今後、様々なバルク物質におけるQHEの探索とその起源解明、さらには理論的研究が望まれる。

- 1) M. Sasaki *et al.*, Solid State Commun., **109**, (1999) 357.
- 2) M. Sasaki *et al.*, J. Phys. Chem. Solids, **57**, (1996) 271.

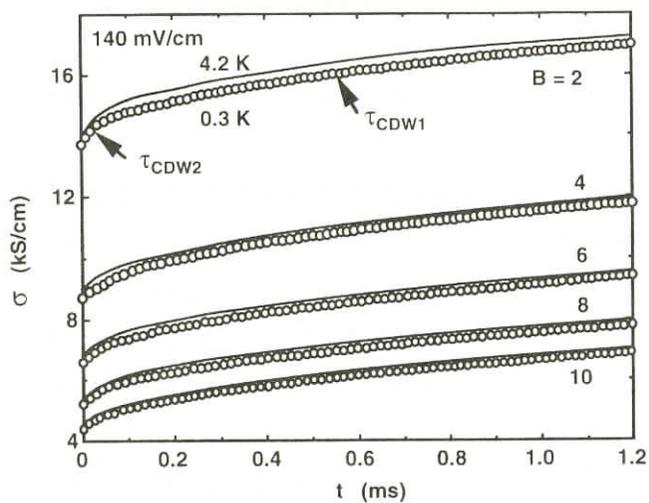


Fig. 1

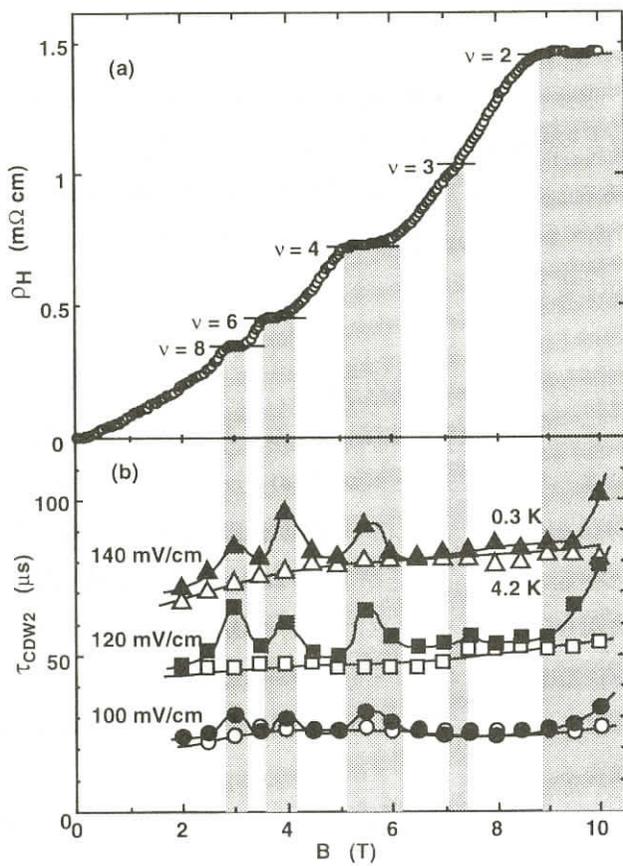


Fig. 2

スピン密度波の並進運動

東京電機大学 工学部 基礎教育系列 長 澤 光 晴

背景および目的

擬一次元有機導体 (TMTSF)₂X (XはAsF₆等の1価のアニオン)は常圧下約10Kで金属-絶縁体転移を起こす。この絶縁体相はフェルミ面のネスティングに起因するスピン密度波(SDW)相である。SDWは電荷密度波(CDW)と同様に、しきい値以上の電場を印加することで、並進運動を起こすことが近年明らかになった。本研究はSDWのピン止め機構やエネルギー散逸機構を、電気的特性を通して、明らかにすることを目的としている。また、CDWと異なり格子ひずみを伴わないSDWの有効質量は、裸の電子と同程度であると考えられる。したがって、SDWの並進運動では量子力学的効果が現れやすいと予想される。今回は、試料サイズ効果、量子力学的トンネル現象の可能性についての報告を行った。

(1) 試料サイズ効果

しきい電場の大きさ(E_T)や温度依存性が断面積に依ることを見出した(図1)。CDWにおいても、 E_T が、試料の厚さや断面積に依存することが示されている[1,2]。 E_T 以上で観測される過渡的電圧振動を解析することにより、試料の断面積の何割が並進運動に寄与しているかを見積ることが出来る(図2)。図2より、SDWでは、ピン止めに対してだけでなく、並進運動にも試料サイズの影響があることが示唆される。

(2) 低温における量子力学的トンネル現象の可能性

低温高電場では電流-電圧特性が温度に依存しなくなるように見える(図3)。Mihalyらは、2K以下の低温で古典から量子力学的なディピンングへのクロスオーバーが起っていると主張している[3]。しかし、我々は0.6Kでも明確なしきい電場が確認しており、少なくとも低電場領域においては古典的なピン止めが起こっていることが示唆される(図4)。高電場における電流電圧特性の変化は、電場によって引き起こされるクロスオーバーである可能性も考えられる。我々は、さらに低温高電場領域で電流-電圧特性を測定する必要があると考えている。また、CDWと同様に、SDWでも低温低電場領域ではクリープ現象[4]が観測されることも期待されるため、今後これについての測定も行う予定である。

なお、本研究は北海道大学の三本木孝、姫路工業大学の安西弘行、各氏との共同研究に基づくものです。

文献

- [1] D. V. Borodin, F. Y. Nad, Y. Savitskaya and S. V. Zaitsev-Zotov, Physica 143B (1986) 73
- [2] D. A. DiCarlo, J. McCarten, T. L. Adelman, M. Maher and R. E. Thorne, Phys. Rev. B42 (1990) 7643.
- [3] G. Mihaly, Y. Kim and G. Gruner; Phy. Rev. Lett. **67** (1991) 2713-2716
- [4] S. V. Zaitsev-Zotov, Phys. Rev. Lett. 71 (1993) 605

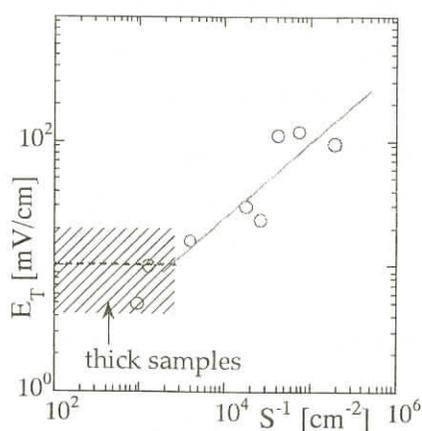


图 1. E_T at 4.2K vs. cross-sectional area(S).

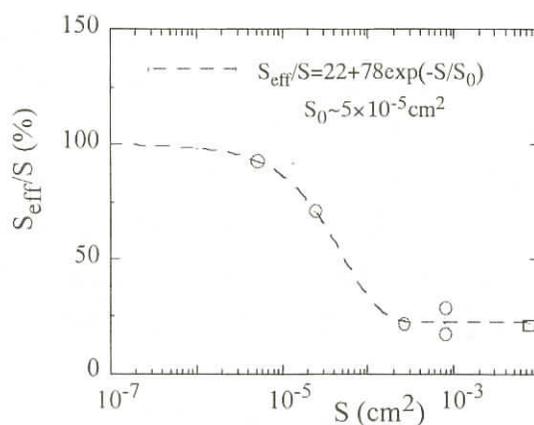


图 2. Normalized effective cross-sectional area (S_{eff}) vs. cross-sectional area (S).
 ○: $(TMTSF)_2AsF_6$, □: $(TMTSF)_2PF_6$

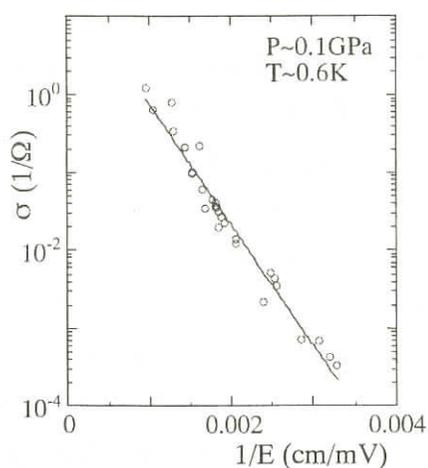


图 3. Conductance vs. the inverse of electric field at high field range

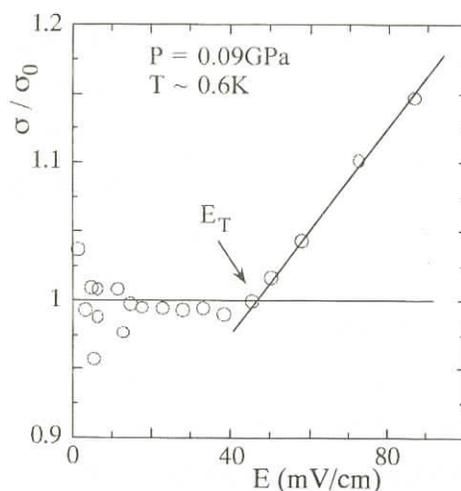


图 4. Normalized conductivity vs. electric field in thin crystal at 0.6K.

超伝導体における磁束格子のダイナミクス
一場所分解磁束密度ゆらぎ測定による動的相図の探求一

東大・総合文化 前田 京 剛

高温超伝導体の磁場下の超伝導状態は多くの新しい物理を含む。特に、熱平衡状態での磁束融解転移が最近確立し、現在の主な興味は、磁束を駆動したときのダイナミクス及び動的相図の問題に移りつつある。

超伝導体の磁束格子のダイナミクスの問題は、電荷密度波・スピン密度波のダイナミクス、さらには、固体の摩擦の問題などと多くの点で共通し、物性物理の重要な一般的問題に通じている。特に、高温超伝導体では、平衡状態での広い磁束液体領域の存在が、いっそう問題を興味あるものとしている。これまで、磁束のダイナミクス・動的相図を扱った理論はいくつかあるが、基本的な点においてすら未だコンセンサスが得られていない。一方、駆動された磁束の性質、あるいは動的相図を実験的に探った研究も非常に少ない[1]。我々は、駆動された磁束の性質を実験的に詳しく探るため、微小ホール素子アレーを用いた局所磁束密度の揺らぎ(ノイズ)や伝導ノイズを測定し、多くの新たな知見を得ることができつつある[2,3]。本講演では、それらの話題を中心に、最近の駆動された磁束のダイナミクスに関する研究を概観した。

局所磁化密度揺らぎは、電気抵抗が表れる直前で最大になる(ブロードバンドノイズ:BBN)。いくつかの試料では、さらに高磁場(BBNがほとんど発生していない領域)で、非常に低周波の「振動成分」(ナローバンドノイズ:NBN)が観測される[2]。NBNに関しては、(1)試料依存性が激しい、(2)周波数は磁束量子のトランジットタイム程度であり、(3)周波数は駆動電流の方向に依存することもある、(4)数百マイクロメートルにわたる空間相関を持っている(図1)といった特徴がある。従って、NBNはセミマクロなピン止め中心により磁束密度に生じた揺らぎが「パリストティック」に試料中を伝わったことによると結論される。これに対して、BBNは対照的に(1)どの試料でも同様に観測され、同一試料のさまざまな場所において同様の振る舞いを示す、(2)しかしながら、その詳細は、場所場所によってわずかに異なる(finger-print effect)、(3)周波数 f に対して、 $f^{-\alpha}$ ($\alpha = 0.8 - 2.0$)の周波数依存性を示す、(4)磁束フローに平行、垂直いずれの方向に対しても、空間相関をほとんど持たない(あったとしても、相関距離は、高々 $25 \mu\text{m}$)。従って、BBNは、バルクピンの局所性を反映した局所的な磁束密度の揺らぎに対応していることが明確に示された[3]。

これらを、様々なパラメーターで繰り返し、(1)いずれの温度・電流でもBBNは、電気抵抗が出始める直前で最大、(2)駆動電流が小さいと、磁束液体相でもBBNはかなりの強度を残すが、駆動電流を大きくすると、BBNは磁束固体相のみで観測され、(3)磁束量子の速度が小さいと $f^{-\alpha}$ ($\alpha = 0.8 - 2.0$)の周波数依存性を示すが、磁束量子の速度が大きくなると、ローレンツ型のスペクトルを示すことがわかった。従って、ボルテックスが動き始める前後で、いわゆるプラスチックフ

ローが実現していることが明らかになった。

最近では、速度揺らぎの測定にも成功し、高温超伝導体ではじめて、いわゆるwashboardノイズの測定に成功している。この成果により、コヒーレント状態の理解が飛躍的に進むことは明らかである。

このように、局所磁束密度揺らぎおよび速度揺らぎ測定は、磁束のダイナミクスを研究する際の、新しい有望な実験手法である。これらの手法を用いて得られた描像を、密度波・ウィグナー結晶のダイナミクス、さらには、固体の摩擦現象などと比較検討し、これらの問題についての理解が深まることを期待する。

[1] T. Tsuboi et al. : PRB55 (1997) R8709.

[2] T. Tsuboi et al. PRL 80 (1998) 4550.

[3] A. Maeda et al. : J. Low Temp. Phys. In press.

超伝導体における磁束格子のダイナミクス :

伝導ノイズ測定による動的磁束の再秩序化の観測

東大院総合 戸川 欣彦
阿比留 竜一
岩谷 克也
北野 晴久
前田 京剛

超伝導体における磁束系の問題は広く研究されてきているが、10年ほど前に発見された高温超伝導体においては、磁束系において重要な、弾性エネルギー・ピニングエネルギー・ラインエネルギー・熱エネルギーの4つのエネルギー量が拮抗するため、実に多様な磁束状態が生まれることが、近年の研究の結果、分かりつつある。このことをふまえると、高温超伝導体における磁束系のダイナミクスの問題は、従来超伝導体にはなかった新たなダイナミクスに関する概念を生み出すことが強く期待される。

理論・シミュレーションによると、plastic flow・incoherent flow・coherent flowのような様々なflow状態が生じることが提唱されているが、高温超伝導体においてどのようなダイナミクスの状態が存在するかは未だ明らかなものではない。

我々は、ノイズ測定により、flow状態にある磁束系のダイナミクスを調べてきた。その結果、コヒーレント状態になった動的磁束が示すべき特徴的なWashboard変調を、伝導ノイズスペクトルにより観測することに初めて成功した。

異方的な高温超伝導体であるBi2212単結晶試料を用い、磁束格子の一次相転移近傍において様々な電流のもと、電圧揺らぎのパワースペクトルを測定した。一次相転移磁場以下の領域において、スペクトル中に、磁場の上昇とともに、高周波側に急激にシフトするピーク（ナローバンドノイズ）が見出された。このピーク周波数は電圧測定より見積もられるWashboard周波数によく一致した。このことは、flow状態にある磁束系が巨視的なレベルでコヒーレントに運動していることを直接的に示すものである。

磁束系において観測したナローバンドノイズは、磁場が上昇するにつれその強度が弱まるといふディフェイジングを示した。このようなディフェイジングは、電荷密度波(CDW)におけるWashboard変調によるナローバンドノイズでも観測されている。しかしながら、理論、シミュレーションによると、いったんコヒーレント状態に入ると、駆動力に上がるにつれノイズ強度は強まることが示されている。この実験と理論の不一致を解き明かすことは今後の課題である。

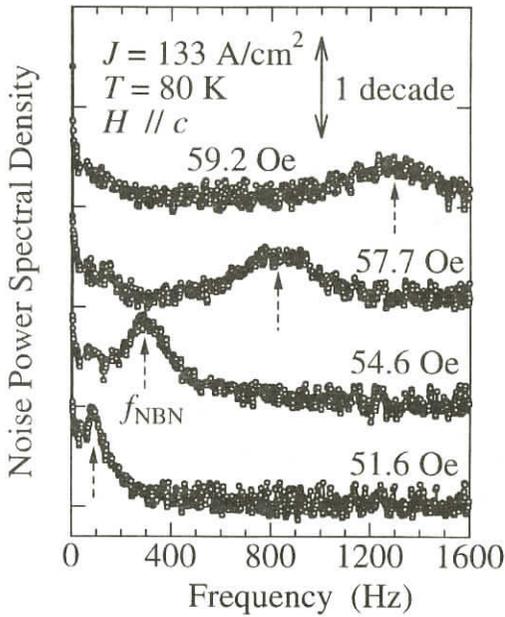


図 1

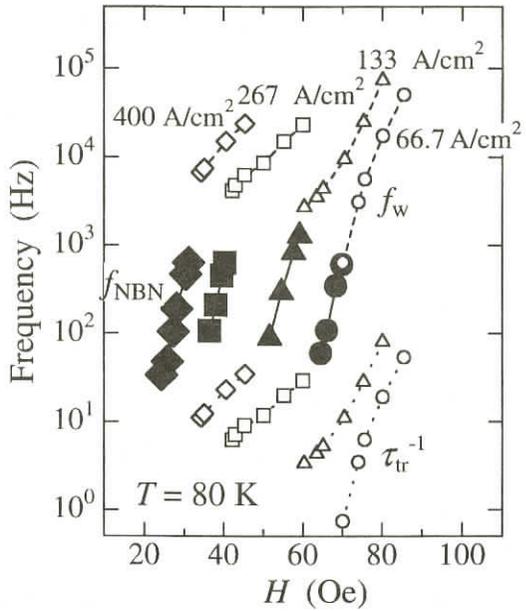


図 2

ピン止めされた磁束格子の相転移：コンピュータ・シミュレーション

日立基礎研 菅野量子
 小野木敏之
 金材技研 平田和人
 立木昌

Lawrence - Doniachモデルに基づく Monte Carlo simulation[1]により、点欠陥(酸素欠損等)がランダムに存在する $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ の磁気相図を数値的に調べた。図 1 (a) 中、磁束の位置 $r_{i,z}$ (i 番目, z 層) に関する ab -面内でのゆらぎ(○: 図1(a)) $\Delta r_{xy} = \langle |r_{i,z} - r_{i,z}^{\text{ave}}|^2 \rangle_{i,z}^{1/2} / a_0$ ($a_0 = \sqrt{\Phi_0/B}$) は、その温度依存性に $T_{dp} \sim 30\text{K}$ と $T_m \sim 69\text{K}$ で折れ曲がりを見せ、2段階の変化を経ることを示す。 T_{dp} 以下では、ピンから外れた磁束の割合 n_{vf} はゼロで凍結しているが、 T_{dp} を超えると、熱ゆらぎが depinning を引き起こす ($n_{vf} > 0$; 図 1 (b))。 T_{dp} 直上から Δr_{xy} は急速に成長し、三角格子秩序に対応する Bragg 強度 (G_1) は不安定化する。 $\Delta r_{xy}(T=T_{dp}) \sim 0.03$ は融解の指標となる Lindemann 則 ($\Delta r_{xy} \sim 0.25$) よりはるかに小さく、 depinning が固体相内での現象であることを示す。また、 T_m においては、 Δr_{xy} と面間のゆらぎ $\Delta r_z = \langle |r_{i,z} - \langle r_{i,z}^{\text{ave}} \rangle_z|^2 \rangle_{i,z}^{1/2} / a_0$ の両者が Lindemann 則を近似的に満たすとともに、 T_m 直上で磁束ガス状態への変化を示唆する急激な増大をみせる。

図 1 (c) に計算で得られた磁気相図を示す。磁束の固体 - 液体融解線 (● : 図 1 (c)) より低温側 30K 付近に、 depinning 転移と考えられる温度軸にほぼ垂直なライン $T_{dp}(B, T)$ が存在する (○ : 図1(c))。 T_{dp} と T_m の間の領域は、弱くピン止めされたグラス相 (soft glass) である。また、 G_1 が消失する磁場 $B_{G1}(T)$ は、 $T > T_{dp}$ で温度増加とともに徐々に減少し、60K より高温側では T_m に漸近する (△ : 図1(c))。一方、 T_{dp} 以下の低温側で温度依存性をほとんど示さない一定値 $\sim 0.5\text{kG}$ をとり、しかも、温度一定で磁場を増加すると B_{G1} 付近で Δr_z が急増する傾向をみせる (図 1 (d))。

これらの計算結果は、部分的に三角格子を残した Bragg glass (図1(c) C相) 及び、強くピン止めされた vortex glass (図 1 (c) A相) が、温度とともに、“soft glass”(図 1 (c) D, B相) を経て、磁束ガス(図 1 (c) E相)へと融解転移することを示唆している。図(e) drift velocity v の温度依存性にもこの2段階の変化が現れることから、soft glass相での磁束ダイナミクスは、磁束ガス状態のものとは異なることが予想される。また、 B_{G1} 付近での Δr_z の急増から、低磁場 C, D相(図 1 (c)) から高磁場 A, B相(図 1 (c))への変化が、c 軸方向に磁束相間のある Bragg glass から c 軸方向に絡みあった vortex glass への非常にシャープな変化であることがわかる。このことは、最近、ジョセフソンプラズマ共鳴実験で、磁化のセカンドピーク近傍に観測された[2]、面間コヒーレンスの急激な減少に対応すると考えられる。なお、本研究は、平成11年度「計算科学技術ソフトウェア研究開発」(日本原子力研究所計算科学技術推進センター)の下で実施された。

REFERENCES

1. R. Sugano *et al.*, Phys. Rev. Lett. 80, 2925 (1998).
2. Y. Matsuda *et al.*, talk at JPS Meeting (Sep. 24, 1999); T. Shibauchi *et al.*, Phys. Rev. Lett. 83, 1010 (1998).

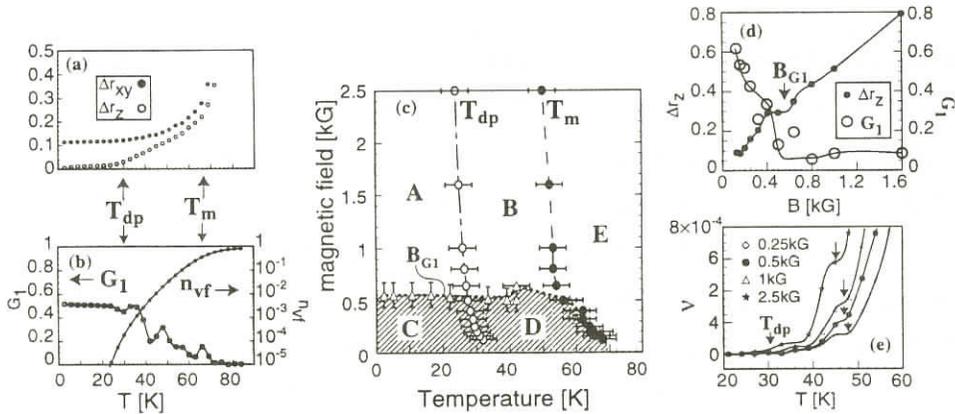


図 1: (a) Δr_{xy} 及び Δr_z の温度依存性 ($B=0.2$ kG); (b) G_1 及び ν の温度依存性 ($B=0.2$ kG); (c) 点欠陥を有する BSCCO の磁気相図; (d) Δr_z 及び G_1 の磁場依存性 ($T=3$ K); (e) drift velocity ν の温度依存性 ($I=50000$ A/cm²)。

ブラッグガラス、渦糸ガラス、渦糸液体における位相コヒーレンス

東京大学物性研究所 松田 祐司

高温超伝導体の渦糸状態は従来の超伝導体とは大きく異なることが知られている。超伝導体の混合状態において渦糸に働く力には

1. 渦糸間の相互作用
2. 熱揺らぎ
3. 欠陥によるランダムポテンシャル

の 3 種類が存在する。従来の超伝導体では 1 が圧倒的に強いため磁束はアブリコソフ格子状態を取る。しかしながら高温超伝導体では磁場の強さに応じて 2 と 3 が 1 よりも強くなるため多種多様な相

が出現する。まず熱揺らぎの効果により渦糸は液体化する。さらにランダムネスはアブリコソフ格子の長距離秩序を破壊しガラス化させる。最近の研究ではガラス相にも2種類存在することが分かってきた。低磁場では格子の周期性がある程度保たれ渦糸が準長距離秩序をもったブラッグガラス相、高磁場では渦糸が複雑に絡み合った渦糸ガラス相が現れる。しかしながらこれらの相間の相転移についてはいまのところ定量的理解には至っていない。特に渦糸ガラスとブラッグガラス間の相転移についてはほとんど理解されていなかった。

高温超伝導体は超伝導層間がジョセフソン効果で結合しているためジョセフソン接合の強度をもとめることが渦糸状態を探る上での重要なプローブとなる。我々は最近ジョセフソンプラズマ共鳴という手法を用いてBi:2212の渦糸状態におけるジョセフソン接合の強度を定量的に求めることに成功した。その結果以下のことが明らかとなった。

1. ブラッグガラス相の内部で渦糸は大きな曲がりくねりを示す。
2. ブラッグガラス-渦糸液体の相転移に伴いジョセフソン接合は大きく変化する。さらに渦糸液体相においてはパンケーキ渦はほとんど結合が切れた状態になっている。
3. ブラッグガラス-渦糸ガラス間の相転移は一次相転移に近い。また一次相転移線はこれまで信じられてきたよりもずっと低温で終結している。

ジョセフソン接合系における位相のダイナミクス

北大院工 明 楽 浩 史

微小な超伝導体を絶縁体を挟んで接合した構造はジョセフソン接合と呼ばれ、超伝導体の位相差のダイナミクスが電流電圧特性を測定することにより観測される。この接合を多数1次元のあるいは2次元的に配列した系（ジョセフソン接合配列）は、多自由度系特有の興味深いダイナミクスを研究する上で大変都合のよい系である。その理由は、(1)近年の微細加工技術の進歩により規則的であり、かつ多様な構造を作製することが可能であること、(2)接合のパラメタを自在に制御することが可能で、それにより摩擦の大きさをoverdamping領域からunderdamping領域まで変化させることができることである。

ジョセフソン接合配列における位相のダイナミクスの代表例は、渦のダイナミクスである。第2種超伝導体や超流動状態においても渦糸の運動が研究されてきたが、ジョセフソン接合配列における渦のダイナミクスの特徴はunderdamping領域に容易に到達できることである。この領域では、加速区域で運動エネルギーを得た渦を自由運動区域に入射することにより渦の弾道運動を観察することに成功している[1]。また、underdamping領域では配列の離散性と相まって、運動する渦はその後方に振動場を発生する (trailing wave)。このtrailing waveの存在は渦に働く摩擦の新た

なメカニズムとなることが数値シミュレーションによって示された[2]。また、運動する2つの渦の間にtrailing waveを介した相互作用が働き、渦分子を形成したり[3]渦配置 (checkerboard pattern) の対称性が破れる[4]可能性が数値シミュレーションによって示されている。このような渦配置の変化はエネルギー散逸の変化をもたらすが、これは渦の速度の飛びとして現れる。たとえば、渦分子は個々独立の渦よりエネルギー散逸が小さいため、同じ外場のもとでより速く走ることができる。

参考文献

- [1] H.S.J. van der Zant, F.C. Fritschy, T.P. Orlando, and J.E. Mooij: Europhys. Lett. 18, 343 (1992).
- [2] U. Geigenmuller, C.J. Lobb, and C.B. Whan: Phys. Rev. B 47, 348 (1993).
- [3] A.V. Ustinov, B.A. Malomed, S. Sakai: Phys. Rev. B 57, 11691 (1998).
- [4] M. Terao and H. Akera, unpublished.

電荷密度波のdislocationの運動とspectral flow

東北大学大学院情報科学研究科 林 正彦

電荷密度波 (CDW) の中に出来る位相欠陥は、CDWの「滑り伝導現象」において重要な役割を担っている。滑り伝導が起きる際には、電流電極から準粒子の形で注入された電子が、CDW凝縮体内部に収容されるプロセスが電極付近で起きる必要があり、それが『dislocation loopの核生成』という形で起こるのである。この核生成率が、滑り伝導の律速段階になっている場合、伝導率そのものが核生成率に比例することになる。したがってdislocationのダイナミクスの理解は、CDWの輸送現象を解明するうえ不可欠といえる。[1-3]

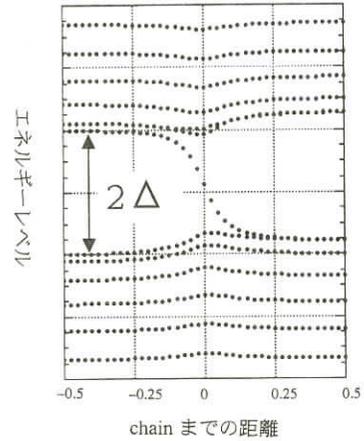
従来、この問題はCDWの凝縮体をGinzburg-Landau理論で記述し、dislocationの核生成率をインスタント法によって計算するというアプローチで議論され、特に滑り伝導のI-V特性に関しては実験とも良い一致が得られている。しかしながら、たとえばdislocationの運動における散逸の効果などについてはさらにミクロな観点からの議論が必要となってくる。

我々は、この点についてdislocationの中心 (コア) におけるspectral flowという現象に着目し、そのdislocationのダイナミクスに対する影響を調べた。spectral flowにおいて特徴的なことは、それがdislocationの中心を介してエネルギーギャップの上から下、または下から上へのエネルギーレベルの移動を行う点にある。dislocationがCDWのchainを横切るときのchain内におけるエネルギーレベルの変化を図に示す。(横軸はchainからdislocationまでの距離である。) spectral

flowの顕著な効果の一つは、Ginzburg - Landau 理論のレベルで電荷の保存則の破れを引き起こしてしまうことである。我々はspectral flowの効果をあらわに取り入れることによって、電荷の保存を満たすような有効作用を導出し、準粒子の運動が凝縮体のそれに比べて十分遅い極限においては従来の結果と一致することを確認した。[4]

参考文献：

- [1] S. Ramakrishna et al., Phys. Rev. Lett. **68**, 2066 (1992).
- [2] Ji - Min Duan, Phys. Rev. **B48**, 4860 (1993).
- [3] H. Matsukawa, in *Quantum Coherence and Decoherence*, ed. K. Fujikawa and Y. A. Ono (Elsevier Science, 1996)
- [4] M. Hayashi, cond - mat/9801094.



電荷密度波のピン止めと不純物効果

阪大院理 湯本正典

電荷密度波とは、1次元伝導体が低温においてパイエルズ転移を起こした時に現れる状態である。もとの格子周期の上に、波数が $2k_F$ (フェルミ波数)の長波長の周期構造が現れ、その変調に電子が附随して出来たものが電荷密度波である。さて、電荷密度波の波長と、もとの格子間隔の比が有理数になる場合、整合電荷密度波と呼び、電荷密度波は、もとの格子により、ピン止めされる。しかし、この系に電場をかけて、電場がある閾電場に達すると、ピン止めがはずれて、非線形電流が流れる。

この現象は、次の様な状況と対応させて考えることができる。表面に周期構造Aをもった台の上には、下の表面に周期構造Bをもった弾性体をのせる。Aの周期とBの周期の比が有理数ならば、上の弾性体は下の台の周期構造にぴったりとはまり込み、上の弾性体に水平方向に微少な力を加えても動き出さない。これは、静止摩擦によって動かないと呼ばれる一例である。しかし、加える力を大きくしていくと、ある大きさの力で、上の弾性体が動き出す。この力の大きさを、最大静止摩擦力と呼ぶ。

これを整合電荷密度波の場合に当てはめると、下の台がもとの格子構造に、上の弾性体が電荷密

度波に、ピン止めが静止摩擦に、閾電場が最大静止摩擦力に、それぞれ対応する。この整合電荷密度波の閾電場が、不純物のような系の乱れによってどのように変化するのは、興味深い問題である。

本講演では、1次元整合電荷密度波に1個不純物が入った場合を考え、福山-Lee-Riceモデルを用いて、絶対零度でこの系を理論的に考察した。電荷密度波の低エネルギー励起は電荷密度波の秩序変数の位相でよく記述されるので、この位相変数を場の変数として、位相変数についての運動を考えるモデルが福山-Lee-Riceモデルである。

まず、不純物が無い場合は、基底状態で位相が空間的に均一であり、そのまわりの揺らぎも均一である。揺らぎは、福山-Lee-Riceのラグランジアン第二変分方程式（これは固有値方程式である）で与えられるが、不純物が無い場合は、連続固有値しか存在しない。そして、電場を加えていき、この連続固有値の最低固有値がゼロになったとき、ピン止めのはずれが起こる。これにより閾電場は定義される。この場合、ピン止めのはずれは、全系一斉に起きる。

一方、不純物が存在する場合は、基底状態で位相が不純物の位置でカスプをもつ、不均一な配置となる。そしてこの基底状態のまわりの揺らぎの固有値方程式を考えると、ある条件の下で、固有値方程式が束縛状態の解をもつことがわかった。この束縛状態は、不純物の周りに局在した揺らぎをあらわし、しかも連続状態よりも小さい固有値をもつ。したがって、この不純物の周りに局在した揺らぎにより、不純物が無い場合の空間的に均一なピン止めのはずれが起こる電場より小さな電場で、不純物の周りで局所的にピン止めのはずれが起こる場合があることがわかった。この現象を「局所的スライディング」と呼ぶことにした。もし動摩擦が小さければ、この「局所的スライディング」は全系のスライディングを引き起こし、全系の閾電場も低下することになる。

以上のように、周期的なポテンシャルによってピン止めされている弾性体に、1個の不純物という乱れを入れただけでも、閾電場（最大静止摩擦力）が低下する可能性があることが明らかになった。特に、電荷密度波に関しては、不純物はピン止めを起こす原因という側面が注目されてきたが、整合電荷密度波の場合には、不純物が閾電場を下げる可能性もあることを指摘した。

本講演は、指導教官である、福山秀敏先生、松川宏先生との共同研究に基づいて行われました。両先生に感謝いたします。

参考文献

M. Yumoto, H. Fukuyama and H. Matsukawa : J. Phys. Soc. Jpn. **68** No.1 (1999)170.

ランダムにピン止めされた弾性系におけるdropletの励起と緩和ダイナミックス

東大物性研 吉野 元

ランダムに分布した不純物によってピン止めを受けた電荷密度波の位相励起や第II種超伝導体の格子の揺らぎなどはランダムポテンシャル中におかれた弾性系として捉えられる。そこでは弾性エネルギーとランダムポテンシャルが複雑に競合し、多数の準安定な配位が存在する。このことから有限温度ではスピングラス的な緩和ダイナミックスが存在することが期待される。[1]

系の熱揺らぎは様々な空間スケールにおける熱励起過程によると考えられる。平衡状態に関するこれまでの統計力学的研究の結果からの類推によって、これらの励起は次のような基本的スケーリング特性を持つと考えられている。ある点 O のまわりの空間スケール L の大きさの励起(droplet)は $\sqrt{W_L} \sim \alpha_0(L/L_0)^\zeta$ 程度(ζ は荒さ指数)の変位を O の周囲に与える。また励起ギャップ ΔF は典型的には $\gamma(L/L_0)^\theta$ 程度(θ は剛性指数)であるが、ランダムな競合系であることを反映してそれと同程度の幅の広い統計分布を持つ。さらにこれらの励起は動的には熱活性によって起こっていると考えられ、その(自由)エネルギー障壁 ΔU は励起ギャップ ΔF と同じようなスケーリング特性を持っていると考えられている。

我々はdroplet励起に関するこれらの知見に基づき、緩和ダイナミックスに関するスケーリング理論を構成し、系の平均二乗変位や動的線形感受率に関するスケーリング則を導いた。さらにこれらを2次元ランダムポテンシャル上の弾性紐のモンテカルロシミュレーションで詳細に検証した[2]。これまではクリープやdepinning転移など、非線形応答による定常状態が主に研究されて来たが、線形応答の特性にはランダム競合系の自由エネルギー構造の縮退性を反映した興味深い現象が現れる。

平衡状態における熱揺らぎは平衡状態からの低励起による。重要になるのは、上記の励起ギャップの統計においてほとんどギャップレス $\Delta F < k_B T$ のものがどんなにおおきなスケール L でも、まれにだが有意の確率 $\propto k_B T / \gamma(L/L_0)^\theta$ で存在していることである。これによってどんなに低い温度でも熱揺らぎおよび無限小の外場に対する応答(線形応答)が大きなスケールでも許され、相応の非常に長い時間スケールをかけて起こる。

一方、非平衡状態からの緩和は、各空間スケールで最も低いエネルギー障壁を越えながら不可逆的に進行していると考えられる。重要なのはほぼ縮退してしまっているエネルギー障壁がまれにだが有意の確率で存在することによってここでも無限小の外場に対する応答が許されることである。この線形応答は非定常でスピングラスと同じように待ち時間依存性(エイジング効果)を持ち、普遍性を持ったスケーリング則に従うことがわかった。

[1] H. Yoshino, Phys. Rev. Lett. **81**, 1493 (1998).

[2] H. Yoshino, preprint.

量子ブラウン運動と共形場理論

東工大 押川 正 毅

摩擦力（散逸力）を受ける運動の量子論に関して標準的なアプローチは、有名なCaldeira-Leggettの論文[1]のように、熱浴を無限個の調和振動子で表現し、これらと粒子を含めた系を量子力学的に扱う方法である。通常は、直接興味のない熱浴の自由度を先に積分して消去（くりこみ）してしまうことが多い。しかし、Ohmicな散逸の場合には、熱浴を含めた系は1+1次元で定義された境界を持つ自由ボソン場の理論に等価でもある(例えば[2])。ここで、ボソン場の境界値が粒子の座標に対応し、境界以外のボソン場は熱浴の自由度を表す。粒子の運動する空間の次元は、ボソン場の成分の数となる。この見方によれば、粒子の運動状態に関するくりこみ群の固定点は、自由ボソン場の共形不変な境界条件に対応する。

粒子が一次元の周期ポテンシャル中を運動する場合、散逸の強さによって局在相と非局在相が存在することは以前より知られているが、これらはそれぞれ一成分の自由ボソン場の理論のDirichletおよびNeumann境界条件に対応する。一方、粒子が二次元以上の周期ポテンシャル中を運動する場合は、局在と非局在の中間的な相が存在する。これは、多成分の自由ボソン場の理論の場合に存在するDirichletでもNeumannでもない極めて非自明な境界条件に対応する。このような境界条件の分類は共形場理論でも未解決の難しい問題であり、一般的には方法論も確立していない。

しかし、ある種の三角格子上の量子ブラウン運動について、YiとKaneは近藤問題の共形場理論を応用して中間相の解を構成した[3]。我々は、この問題は三状態Potts模型の境界条件[4]にも関連することを示し、新たな相を発見するとともに、様々な相の構造を明らかにした[5]。

[1] A.O. Caldeira and Leggett, Ann. Phys. (N.Y.) 149, 374 (1983).

[2] C.G. Callan, et. al. Nucl. Phys. B 442, 444 (1995).

[3] H. Yi and C. Kane, Phys. Rev. B 57, R5579 (1998).

[4] I. Affleck, M. Oshikawa and H. Saleur, J. Phys. A: Math. Gen. 31, 5827 (1998).

[5] I. Affleck, M. Oshikawa and H. Saleur, 準備中

金属クラスターネットワークの電気伝導特性への動力学的効果

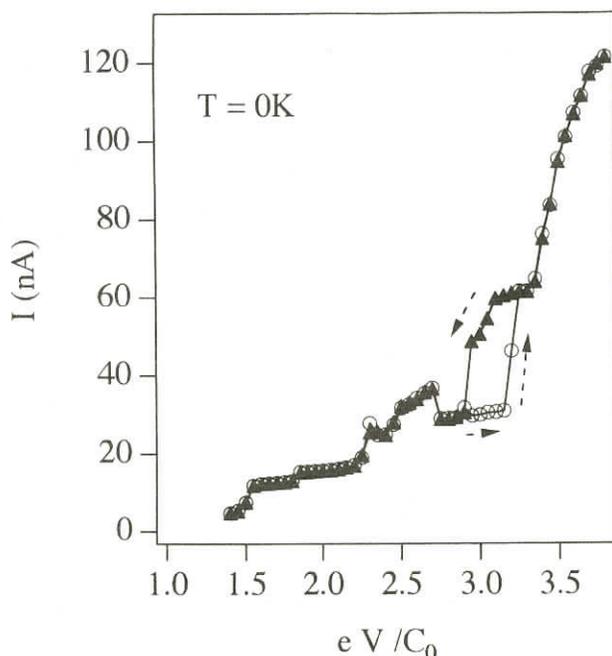
北大院工 西口規彦

室温で動作する単電子トンネルデバイスを目指して、ナノメートルサイズの金属コアを絶縁性の有機物質が取り囲んだ金属クラスターを結合した系の電気伝導特性が、実験的に調べられている。このクラスターネットワークにおいて、リガンドの弾性によるクラスターの動力学的な振る舞いが、電気伝導特性に著しく影響を及ぼすと考えられる。今回、連結した2個のクラスター系の電気伝導特性をシミュレーションにより調べたので報告する。

クラスターの運動はルンゲ=クッタ法により求め、電子のトンネル伝導にはモンテカルロ法を用いた。金のクラスターのAu₅₅について、図に示すような電流-電圧特性が得られた。その特徴として、1. クーロン階段、2. 電流の急激な低下、3. ヒステリシスがみられた。さらに、ヒステリシスの現れるポテンシャル領域で、電流が時間に関してランダムに2つの値をとり、あたかもランダムな電信信号のような電流の時系列を得た。

クーロン階段に及ぼすクラスターネットワークの動力学的な効果は、クーロン階段のステップを傾斜させるにとどまり、あまり顕著ではない。一方、その他の電流-電圧特性は、クラスター振動の効果が顕著に現れたものである。クラスターネットワークの振る舞いは準周期的また周期的振動を示し、電流の急激な低下は準周期的振動から周期的振動への振動数同期により生じたものである。また、ある特定のポテンシャル領域でこれら2つの振動状態が存在し、その発現が履歴を伴うためにヒステリシスが生じる。これらの2つの振動状態は安定ではあるが、希にこれらの状態間の遷移が生じる。電子のトンネルは量子力学的な確率に従っているが、クラスター振動が周期的な場合、トンネルもまた規則的に生じる。しかしながら、まれに不規則な電子のトンネル伝導が生じ、系の静電のおよび力学的エネルギーを増加させ、これがきっかけとなり準周期振動へ遷移する。一方、準周期振動から周期振動への遷移は、クラスター振動のポテンシャルエネルギーが運動エネルギーへ変換されず、リガンドの複素弾性係数（摩擦）により散逸することに因る。このエネルギーの散逸は、クラスターに及ぼす静電的な駆動力が一時的に消失もしくは低下したときに現れ、その頻度は非常に少ない。しかしながら、これら2つの遷移機構があるため、ヒステリシス領域では、電流のランダムな時系列が現れることとなる。

100個以上の金クラスターAu₅₅の1次元鎖の電気伝導の測定が、米国オレゴン大、ダートマス大で行われており、ヒステリシスおよび電流のランダム電信信号が観測されている。このことから、クラスターネットワークの電気伝導特性に及ぼすネットワークの動力学的な効果の重要性が明らかと言える。



層状磁性体におけるスピンのスローダイナミクス

北陸先端科学技術大学院大学 材料科学研究科 小矢野 幹 夫

非磁性の層状物質 TiS_2 は、Tiの2次元三角格子をSの三角格子がサンドイッチした単位層が、ファンデルワールス力で積み重なった構造を持っている。この層間にFeを濃度 x でインターカレーションしたものが、層状磁性体 Fe_xTiS_2 である。ゲストのFeは、 $x < 0.22$ ではランダムに、 x が $1/4$ や $1/3$ という整数比を取るときには自己組織的に $2a \times 2a$ あるいは $\sqrt{3}a \times \sqrt{3}a$ の超格子構造を形成して、インターカレーションする(超格子は結晶内で一様ではなく、クラスターを形成する)。このような結晶構造を反映して、磁氣的性質も x に依存して、スピングラス($x \leq 0.20$)、クラスターガラス($0.20 < x \leq 0.40$)、強磁性($x > 0.40$)と様々な磁気秩序を示す。[1]

本研究では、スピングラス(以下SG)とクラスターガラス(以下CG)でスピンの振る舞いがどのように異なるのか、さらに2次元三角格子ネットワーク上でランダムフィールドを感じて一種の摩擦を受けながら、スピン緩和がどのように起こっているかを明らかにすることを目的として、複素交流磁化率の実数成分 x' および虚数成分 x'' を、温度4.2から80Kまで測定した。この実験ではなるべく小さなレイリーループを描かせる必要があるため、SQUID磁束計を改良して50mOeの微小磁

場振幅, 0.5から100Hzの低周波で測定できるように工夫している。[2]

SGの $x=0.1, 0.2$ では, x はガラス転移温度 T_g でカスプを, CGの $x=1/4, 1/3$ ではピークを示す。 x'' はいずれも T_g 以上ではゼロであるが, それ以下で増加しており, グラス相でロスが増大することを表している。また T_g は, 周波数とともに上昇するという振る舞いを示す。

磁化率の周波数変化に対して, 拡張緩和関数

$$\chi(\omega, T) - \chi_{\infty}(T) = [\chi_0(T) - \chi_{\infty}(T)] / [1 + (i\omega\tau_0(T))^{\beta(T)}]$$

を当てはめると, スピンの緩和時間の分布関数 $q(\tau, T)$ の中央値は $\tau_0(T)$ で, 幅は $\beta(T)$ で表現できる。実験値へのパラメーターフィッティングにより, これらの値の温度変化を求めた。温度を下げて行くと, SGの試料ではガラス相で $\tau_0(T) \sim 10^{-2}$ 秒に留まるのに対して, CGでは $10^3 \sim 5$ 秒まで遅くなっていく。逆に幅の方は, SGの方がCGよりも高温から著しく広がり始める。

このように, SG($x=0.20$)とCG($x=1/4$)では, 濃度がたった0.05しか変わらないにもかかわらず, スピン緩和には大きな違いがあることが分かった。この違いを, 2次元三角格子状でのサイト-パーコレーションモデルを用いて検討する。

2次元三角格子上に, 濃度 x でFeをランダムにばらまき, 第1近接サイトどうしを繋いでいったとき, 格子の端から端までパーコレートするためには $x=0.5$ の濃度が必要であることが理論的に分かっている。同じことを第2および第3近接サイト間で行ってパーコレーション確率を計算すると, ちょうどSGとCGの境界 0.22 ± 0.01 の濃度で第3近接サイト間がパーコレートする。一方, より近い第2近接サイト間は $1/4$ と $1/3$ の間(0.29 ± 0.01)でパーコレートするが, 実験結果が示すように, ここでは緩和の様子に大きな違いは無い。このことから, この系の緩和過程では, 第2近接ではなく第3近接サイト間を介したネットワークが重要な働きをすることが明らかとなった。類似の結晶構造を持つ Fe_xNbS_2 でも $2a \times 2a$ 超格子が交換相互作用を増強することが示されており, [3] この場合も第3近接サイト間を介した相互作用が重要である。

参考文献

- [1] H. Negishi *et al.*; J. Magn. Magn. Mater. **68** (1987) 271.
- [2] M. Koyano *et al.*; J. Phys. Soc. Jpn. **63** (1994) 1114.
- [3] M. Koyano *et al.*; Proc. of 10th Int. Symp. on Intercalation Compounds (1999) pp. 164.

強誘電体・強弾性体のドメイン・ウォール

愛知淑徳大学 石橋善弘

強誘電体・強弾性体にドメインやドメイン・ウォールが存在するときの、秩序変数の空間変化、ウォール・エネルギーの分布について概観した。

強誘電体では、秩序状態をあらわす自由エネルギー関数は物質毎に異なるが、いくつかの代表的なケースに分けられる。転移パラメーターが1つで、2次転移の場合は p^4 モデル、1次転移の場合は p^6 モデルがよくあてはまる。前者では長さのスケールがただ1つ、後者では2つある。また、前者ではウォール・エネルギーはウォールの中央に分布しているが、前記長さのスケールはその分布の幅に対応している。他方、後者ではウォール・エネルギーはウォール中央の両側に別れて分布しているが、上記2つの長さのスケールのうち1つはエネルギーが集中している場所の間隔、他は各場所でのエネルギー分布の幅に対応している。温度が下がると、 p^6 モデルは p^4 モデルに近づく。

チタン酸バリウムの90度ウォールや、多くの間接型強誘電体のように、秩序変数が2つ以上ある場合には、ウォール内での秩序変数の空間変化は、2次元平面上の軌跡であらわすのが便利である。その軌跡を計算するとき、一定振幅近似ではsine-Gordon方程式に、近似をあげればdouble sine-Gordon方程式になる。得られる結果は定性的には、前者が p^4 モデルに、後者は p^6 モデルの結果に近い。

強誘電相より高温側に不整合相があるような場合には、強誘電相でのウォールを議論するためには、不整合相転移を説明できる自由エネルギー関数を用いなければならない。不整合相が出現するという事は、系が空間変調を好むということであり、ウォール内で秩序変数に振動的様相があらわれるはずである。不整合相の安定領域から遠ざかるにつれて、振動が小さくなる。

強弾性体の場合は、ウォール面の配向に関して対称性の考察が不可欠である。これはウォール面上の原子が分割出来ないことによる。弾性的ソフト・モードの対称性によっては、結晶軸に不整合な方位のウォール面が出現することが知られている。

結晶内の双晶界面の断続運動

北海道大学理学研究科物理学専攻 川端和重
三本木 孝

双晶境界は境界両側において結晶方位が異なる。強磁性体のブロッホ壁（両側は磁化の方向が異なる）、強誘電体のドメイン壁（両側は自発分極の方向が異なる）、強弾性体などの界面と同様に、双晶界面の両側では同じエネルギー密度である。このため、外部応力により境界面は結晶内を運動

することができる。双晶境界が動くと、境界面上および両側の分子の相互作用によって面上の分子は回転・変位する。これは、潤滑剤のない平坦な面の摩擦が、面の両側にある原子・分子間の相互作用で決まることと類似している。しかし、摩擦が界面に平行な運動に付随する現象に対し、双晶界面の運動は、面に垂直な方向の運動である。摩擦は接触面全体の平均的特性であるのに対して、双晶境界の運動は境界の位置における結晶の不均一性を強く反映する。この意味で、固体境界の運動は結晶内の局所的摩擦と対比できる。

有機結晶(TMTSF)₂Xは典型的な有機超伝導体としてよく知られている。結晶系は三斜晶系である。結晶に1つの境界面を導入すると、その位置で結晶は約20度折れ曲がるので容易に境界面の形と位置をとらえることができる。このため、この系は結晶内の孤立した境界面の運動をリアルタイムで観測する事が可能である。

一定外部応力下で境界面を運動させ、境界面の変位を時間の関数として測定した。以下に運動の特徴を列記する。

①媒体の不均一性（欠陥などの分布）を反映し、局所的速さが場所に依存する。また、運動は間欠的（特定の位置で一旦停止し、ある時間経過後に再び動き出す）

②温度・応力・運動開始前の待ち時間は速度に強く影響する。

静止摩擦力に相当する臨界応力がある。運動開始前の待ち時間の増加とともに速度が減少する。これは、媒質の長時間緩和をにもとづく現象で、摩擦における記憶効果とは異なる。速度の温度依存性は外部応力によって大きく変化する。

③一定外部応力の下での一旦停止は摩擦にはない独特な現象であり、停止時間は同一環境においても速度に比べて非常に大きな揺らぎを示す。この結果は、停止状態が速度の遅い極限とは異なることを示す。

これらの運動の特徴は、単純な剛体モデルでは説明できず、境界面および格子系に内在する自由度を反映するものと考えられる。双晶境界の運動は、強誘電体や強磁性体ドメイン壁の運動との共通性も期待される。さらには、摩擦現象における接触面積の変化を除いた境界面の両側間の分子集団の動的性質を調べることも可能性である。

1) M. Mukoujima, K. Kawabata, T. Sambongi, Eur. Phys. J. B7, 365(1999)

理想的摩擦実験

東京大学生産技術研究所 鈴木敬愛

互いに接触する二つの固体を接触面に沿って滑らせるときの摩擦抵抗を測定し、普遍的法則を見出したい。なるべく平滑で清浄な表面から始める。さまざまな物質の組み合わせがありうるが、まず同一の物質、結晶なら単結晶から、となる。二つの結晶の方位関係は任意に選べる。一般に、結晶方位の異なる二つの結晶が接合しているとき、それは結晶境界(または、粒界)と呼ばれる。多結晶はさまざまな方位関係の結晶粒界を含んでいる。粒界すべりは、原子の拡散が容易となる高温でないと、起こり難い。

さて、二つの同種の結晶を方位関係まで揃えて接合したとすると、接合面は結晶中の他の原子面ともはや区別できない。結局、意図する摩擦の実験は、単結晶のある原子面に沿ってすべりを起こさせるのに必要な力(せん断応力)を求めることになる。せん断弾性率(剛性率)を G とすると、それはおよそ $G/10$ となることが簡単な考察からわかる。これを「理想的すべり(せん断)強度」という。ところが、多くの物質(結晶)はこれよりはるかに小さい応力ですべりを起こす。その際、すべりを起こしうる面は任意ではなく、特定の原子面(すべり面)に限られる。例えば、鉄の場合 $\{110\}$ 面に $10^{-3}G$ の応力が、銅なら $\{111\}$ 面に $10^{-5}G$ の応力が加わればすべりを起こす。すべりは、互いに平行な原子面のどこで起こってもよいから、多数の原子面ですべりを繰り返せば、結晶全体は巨視的にせん断変形する。これが「塑性変形」である。塑性変形を起こすのに必要な力を「降伏応力」といい、巨視的な変形実験によって求められる。降伏応力が理想的すべり強度よりはるかに小さい理由は、「転位」の運動によってすべりが起こるからである[1]。転位が特定の原子面(すべり面)の上を運動することによって、その原子面全体がすべりを起こす。したがって、原子面のすべりに対する抵抗は、すなわち転位の運動にたいする抵抗である。

絶対0度で転位を動かすのに必要な力を「Peierls力」という。これは結晶の周期性に由来する力で、結晶構造と相関がある[2]。Peierls力は転位の運動に対する静止摩擦といえる。外力の下で運動する転位は格子の振動を励起し、弾性波を輻射する。輻射された波は結晶の非調和生によって散乱し熱となる。Ishioka[3]は単純立方晶中のらせん転位が等速運動する解を求めている。それは、2次元の単純な系ではあるが、転位の動摩擦を求めたことに相当する。有限温度では、熱振動の助けによって、転位はPeierls力より低い力でも動くことができる。転位は湾曲することによって熱的に有利な道をたどる。このような系の動的性質を3次元的に扱うことがわれわれの課題である。

[1] 鈴木敬愛, 日本物理学会誌53(1998)833.

[2] T. Suzuki and S. Takeuchi, Lattice Defects in Ceramics ed.by T.Suzuki and S. Takeuchi (Publication Office of JJAP, 1989)p.9.

[3] S. Ishioka, J. Phys. Soc. Japan 33(1971)323.

転位の運動における摩擦

明大理工 小泉 大一

転位の運動を妨げるものの1つに、結晶の並進対称性から生ずるポテンシャル、すなわち Peierlsポテンシャルがある。転位が運動を始めるときには、このポテンシャルを越えることが必要であり、転位に対する静止摩擦になる。いったん転位の運動が始まると、転位はPeierlsポテンシャルの凸凹を感じながら動くので、速度が周期的に変化し、弾性波を輻射してエネルギーを失う。このプロセスが転位の動摩擦を与える。簡単なモデルを使って、Peierlsの大きさの評価と運動する転位が輻射する弾性波のシミュレーションをした。

単純立方格子で原子はz方向にだけ変位するとしたモデル結晶に、z方向に平行ならせん転位を導入した。最近接原子列間には $V(u)=1-\cos(2\pi u)$ (uは隣接する原子列の変位の差) のポテンシャルを仮定し、転位は直線のまま動く場合を扱った。結晶にかかる外力を増やしていき、転位が安定位置を持たなくなる力を求めると、それがPeierls応力になる。この場合 0.693 である。

外力下で、Peierlsポテンシャルの山の部分においた転位の運動を追いかけると、外力が十分に大きいときには図1のようにすぐに定常的な運動にはいる。このとき、転位は図2のように弾性波を周期的に輻射し、外力によってされた仕事分だけのエネルギーを放出している。

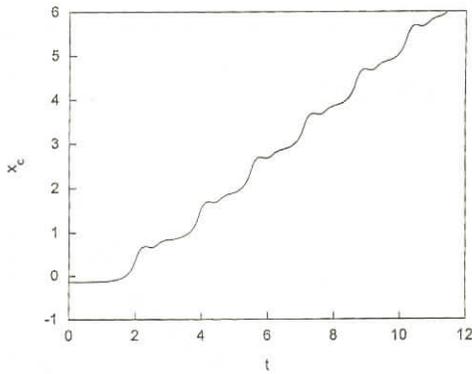


図1 外力 0.47 のもとでの転位位置の時間変化

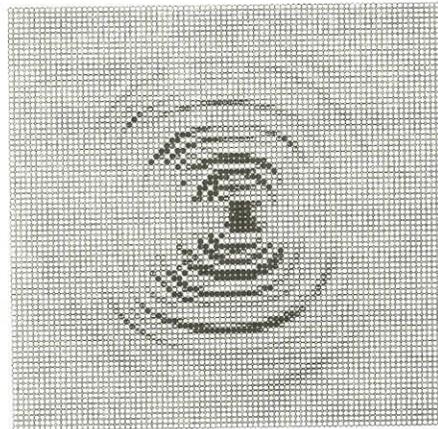


図2 外力 0.47 のもとで転位が動いたときに出る弾性波。原子列のz方向の速度に比例した濃さで表している。

量子固体ヘリウム3における転位の量子的運動

名大院理 三浦裕一

一般に固体中には転位や空格子点が存在し、それらの摩擦を伴った運動が固体の剛性率や内部摩擦に大きな影響を与えている。転位は不純物があるとピン止めされ、結晶場（パイエルスポテンシャル）での運動を研究する障害となる。しかし、事実上不純物を無視できる純粋な固体ヘリウム3を対象とすると、理想的な条件で転位の運動を研究できる。また、低圧のbcc固体ヘリウムは特に原子の零点振動が激しいので量子効果が期待できる。

転位の熱活性型運動から量子的運動までを研究するには、極低温以下、ミリK領域まで極めて微小な歪み率(応力)で固体の剛性率と損失を測定する必要がある。そこで我々は0.03Kの低温まで充分小さい歪み率、十のマイナス8乗、まで剛性率と損失を同時測定できる捻れ振動子を開発した[1]。

1図は捻れ振動子を示す。最上部の捻れパイプは外径1.0mmであり、直径0.6mmの穴の中に固体ヘリウム3が形成されている。駆動は静電引力で行い、捻れ振幅は静電的に検知する。共振周波数は約940Hzである。剛性率は共振周波数の変化から、内部摩擦による損失は共振線幅から求める。一定に加圧された液体を冷却していくと液相-固相共存線に達し固体が成長を始める。そして完全固化した瞬間に試料固体の寄与の分だけ共振

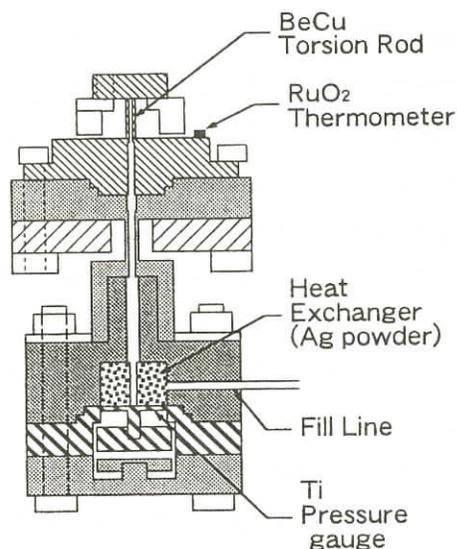


図1

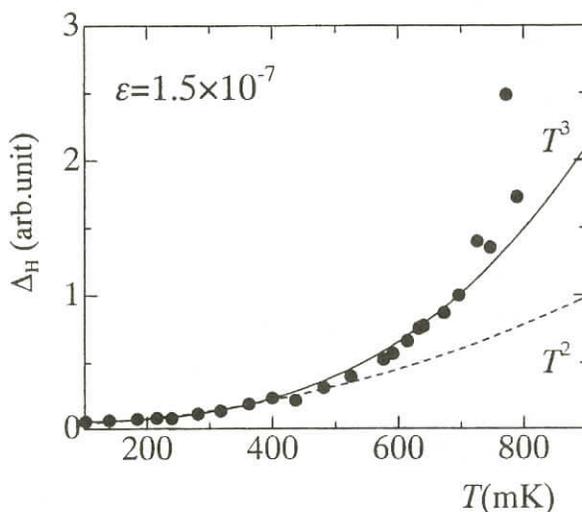


図2

周波数，即ち剛性率が急に増加する。捻れパイプが損失が小さい材質(BeCu合金)で共振周波数が安定している条件では，内部の柔らかい固体ヘリウムの剛性率と内部摩擦による損失を十分な精度で測定できる。

理論的モデルでは，転位は粘性流体の中で振動する弦として取り扱われる。2図は歪み率が 1.5×10^{-7} のときの内部エネルギー損失の温度依存性を示す。この微小な歪み率の領域では，転位線はパイエルポテンシャルを越えて運動できない。ポテンシャルの谷内で振動する転位線の感じる粘性はフォノンと転位の相互作用から計算されており，温度依存性 T^3 は二ノ宮の理論 [2] と一致している。しかし，hcp 固体ヘリウム 4 における捻れ共振器の結果， T^2 [3] とは異なる。

摩擦を伴った転位の量子的運動の兆候も観測されており，更に実験中である。

本研究は 小川健一，森一央，馬宮孝好 氏との共同研究である。

Ref.

- [1] Miura et al., J. Low Temp. Phys. 110 (1998) 115, 113 (1998) 757, Physica B (1999) in press.
- [2] Ninomiya, J. Phys. Soc. Jpn 36 (1974) 399.
- [3] Paalanen et al., Phys. Rev. Lett. 46 (1981) 664.

2 固体表面間の滑り摩擦・その認識の歴史・

千葉工大 笹田 直

1. クーロンの摩擦法則

二つの固体が互いに滑りあうとき，抵抗力を生ずるという現象すなわち摩擦は，有史以前から人類に知られていた。人はその摩擦のために苦しみ，それを低減しようと工夫し，あるいは場合によってはそれを利用して生活に役立ててきた。だが，摩擦が現代的な意味での科学的研究の対象となったのはずっと後世のことである。

現存する摩擦に関する“学術的”な記録は Leonardo da Vinci(1452 - 1519) が最古である。彼は今日言うところのクーロンの摩擦則，すなわち摩擦界面における接線抵抗 F は法線力 P に比例すると言っている。注目を要するのは 2 固体の接触面積（今日の言葉で言うと見掛けの接触面積）がその接線抵抗すなわち摩擦抵抗に関係しないことを述べていることで，摩擦の“法則”について語った最初の記述であると言ってよい。もちろん現在われわれが知る摩擦係数一定という数式 $f = F/P$ (f は摩擦係数) を与えた訳ではない。力の定義のなされた Newton 以前にそれを求めるのは無理というものである。Leonardo は荷物を 2 倍にすると引っ張るのに 2 倍の労力を要する，

と表現したにとどまる。だが今日の大多数の人の摩擦に関する認識は上式から一步も出ていないのであって、その意味では Leonardo は偉大である。

自らの実験から上の法則を帰納したのは G.Amontons(1663-1705)で、1699年パリで発表された。それにちなんでこの法則をアモントンの法則という人が今でもいる。ようやく産業革命が起きつつある頃で、この法則を提唱した実用的な意義ははなはだ大きい。それがなければおそらくは大部分の機械は設計することが不可能になっただろうからである。

Amontons は接触面積、荷重(法線力)にかかわらず摩擦係数一定という経験的法則を提唱したが、必ずしもそれが万人に認められた訳ではなかった。とくに接触面積に無関係とは疑わしいとされ、彼のパリ・科学アカデミーでの講演発表はしぶしぶ許可されたとの記録すらある。この点に関しさらに実験的データを重ね、さらには Amontons の触れていなかった摩擦係数が速度に無関係であるということを主張したのが C.A.Coulomb(1736-1806)である。電磁気学の研究で名声を博した彼は晩年摩擦に取り組み、1779年それを発表した。クーロンの摩擦法則とはもちろん彼の名に由来する。

2. 凹凸説と凝着説

このような摩擦がなぜ発生するかという機構に関しては、人は長い間、固体表面の凹凸がその原因であると思っていた。ニュートン力学の用語をもってすれば、表面の凹凸に沿って固体が運動するときの位置のエネルギー損失が摩擦消費エネルギーだということである。ただしこれには注釈が必要で、遊園地のジェットコースターのように凹凸斜面を下るときに得た速度エネルギーが上るときに位置エネルギーとして回収されるなら、摩擦抵抗はゼロにならざるを得ない。当時考えられた機構とは、表面凹凸の形状はなめらかでないから、下りのときは谷底に衝突してしまい、速度エネルギーは熱となって回収されず、斜面を上る為のエネルギーだけが摩擦として認識される、というものであった。これによると摩擦面に潤滑油を塗って摩擦を低減させる効果は、油が凹凸の凹部を埋め、表面を平滑にするためと説明されていた。このような、摩擦の原因は表面凹凸に沿った上下動に基づく位置エネルギーの損失であるとする考えを摩擦の凹凸説(Roughness theory)と呼んでいる。

凹凸説は長く人々のいわば常識であったが、17世紀も終わりに近づく頃から別個の考えが現れた。1725年の Desaguliers に代表されるもので、要するに2固体が接触するとき、両者はくっついてしまい、それを専断するための抵抗が摩擦だ、とする。これを摩擦の凝着説(Adhesion theory)と呼んでいる。これによると摩擦は表面凹凸には関係なく、2固体が互いに凝集しやすいか否かで決まる筈である。この場合、当然潤滑油が間に挟まれれば凝着を妨げ、摩擦は低減する。

Coulomb は彼の実験を通して、凹凸説・凝着説のいずれかに軍配を上げようとした。その決め手とした現象が接触面積効果である。もし事実として摩擦抵抗が接触面積に比例するなら凝着説、接触面積に無関係なら凹凸説だ、とした論理は正鵠を得ていた。そして彼自身の実験結果から後者

を指示した。Coulombのこの判断が以後150年にわたって摩擦の機構として世に受け入れられることになる。

3. 現代摩擦凝着説の展開

摩擦が凹凸説で説明されるとなると、人は低摩擦を得る目的で平滑な表面を作り出そうとした。たしかに18世紀、19世紀初頭の加工技術の未熟な間はそれは効果的であった。ところが20世紀に近付くと技術が進歩し、凹凸の高さを μm 近くに仕上げることが可能となってきた。摩擦はゼロになってもいいはずと思われたにもかかわらず、一向に減らないのみか逆に平滑にし過ぎると摩擦が大となることすらあったのである。そのような経験的認識とともに、以下のような事実が知られてくるに従い、凹凸説自体に対する反省が芽生えてきた。

- 1) 凹凸説から導かれる摩擦係数は山の高さではなく、凹凸斜面の傾斜角だということがわかり、しかもその傾斜角は山の高さによってあまり変わらないことが判ってきた。
- 2) 摩擦に伴う物体の上下動を実測したところ、それによるエネルギー損失は摩擦で消費したエネルギーの5%以下に過ぎなかったこと。
- 3) 固体表面を清浄にする技術が発達するとともに、化学的に清浄な表面の摩擦が著しく大である事実が認められてきたこと。
- 4) 逆に表面を素性の判った第3の物質(たとえばアルカンシリーズ)で汚してやると固体の摩擦は汚れの化学構造によって支配されることが判ってきたこと。

これらの現象はいずれも過去の凹凸説では説明し難いものであった。現代の摩擦理論はこのような反省の結果生まれたのであるが、その中でもとくに界面化学から上記3), 4)の問題にアプローチを試みた1920年代 W. Hardy, I. Langmuir の功績は大きい。

摩擦理論に関してもう一つ、全く別の方面から重要なアプローチが同じく1920年代になされた。R. Holm は固体同士の接触が古典的な意味での接触面全域で行なわれるのではなく、表面突起の先端同士の塑性変形で作られるはるか微小の面積でおこなわれる事を示したのである。こんな当然かつ簡単なことになぜそれまで気がつかなかったのか不思議なくらいだが、Holmはこの微小面積を真実接触面積と呼び、それまでの見掛けの接触面積と区別し、摩擦・摩耗はこの真実接触面積の中においてのみ生じ得ると考えた。

上の2つの大きな流れ、すなわちHardyらの表面汚れの問題と、Holmの接触の問題を一つにまとめて摩擦の凝着説を復活させたのがCambridge大学のF. P. Bowden(1903-1968)とD. Tabor(1913-)で、1939年にはほぼその体系は整ったのである。ごく大まかにそれを述べると、

- 1) 表面にはかならず凹凸が存在し、2固体の接触は点在する突起先端同士の塑性変形によって行なわれる。(真実接触部の形成)
- 2) 真実接触面においては固/固界面が形成される。ただしその界面には汚れの吸着分子が含まれることもある。

3) この固／固界面を剪断破壊する抵抗が摩擦抵抗である。

ということであり、2)で述べた界面を効果的に汚す技術を“潤滑”と呼んだ。この考えを支える彼らの論文は数多いがとくに重要なのは次のようなものである。

1) 真空中で十分清浄にした表面間の摩擦が極端に大きく、ときには ∞ とも見られることのあることの実測(1936)。

2) 有機分子膜による表面汚れ(潤滑)と摩擦との系統的研究(1936)。

3) 摩擦に伴う“閃光温度”の発生の実証(1939)。

第二次世界大戦中、および戦後の今日まで、多数の研究者が摩擦の機構の解明、ならびに工業その他の実際における摩擦問題に取り組んだが、大筋は Bowden - Tabor の新しい凝着説を認めるものであるとよい。

蛇足だがBowdenの仕事をもう一つ挙げよう。それは摩擦・摩耗・潤滑の分野の学術・技術をさす用語として Tribologyなる新語を提唱したことである(1966)。τριβολογίαとして作られたこの単語は瞬く間に世界に広まった。その待たれる土壌があったというべきなのであろう。

4. 工学における現代の摩擦問題

最後に現代の摩擦の実際問題について触れよう。摩擦は多くの場合、小なることが望まれるが、ブレーキなどでは大でなければならない。摩擦自身より実際上関心が払われるのは摩擦の結果生ずる摩耗、およびさらに破局的な事故の原因となる焼け付きである。これらの現象の及ぼすところの大きな分野として、筆者はここに次の3つを挙げようと思う。いずれも現代を代表するトライボロジー問題であること、いうまでもない。

1) 磁気記録デバイスにおけるトライボロジー

コンピューターの磁気ディスクとヘッドの隙間は狭いほど記憶容量が大である。現在その隙間はディスク／ヘッド間を気体潤滑軸受とすることによって保持しているが、すでに大気圧下の窒素・酸素分子の平均自由行程より小である。それをどうやってさらに縮めるか、またストップ・スタート時における摩耗(当然記憶も摩耗してしまう)をどうやって防ぐかは、コンピューター・ハード技術の最重要課題と言ってよい。

2) スペース・トライボロジー

宇宙空間は真空に近いからその場においては摩擦は極端に大となる。ロケット内の機器を円滑に作動させるには、その潤滑に特別な配慮が必要となる。もちろん油は蒸発してしまう。固体潤滑剤がそれにとって代わることが多い。

3) バイオ・トライボロジー

ヒトの関節の摩擦係数はスキーやスケートのそれより小さい。一方、ヒトの掌・足の裏の摩擦係数はブレーキのそれより大である。これらの機構の理解とその人工的模倣は、医療・福祉に大きな影響を与えるものである。

表面における摩擦と散逸の素過程—吸脱着と原子間力顕微鏡

東大院理 塚田 捷

前半ではマイクロな表面現象の動的過程を支配する要因として散逸過程の重要性をのべ、また後半では原子間力顕微鏡で摩擦の素過程としてのスティックスリップ現象が観察されることを述べた。表面における原子分子の動力学を支配するものは、断熱ポテンシャル面とエネルギー散逸である。後者は反応速度や様々な終状態への分岐率を決定づける。このような過程を理論的に解析する有力な方法として、確率的トラジェクトリー法がある。この方法では反応領域を主領域と環境領域に分割し、後者の無限自由度を消去して得られる一般化ランジェバン方程式を数値積分する。表面での反応散乱現象に適用した計算例を紹介し、この方法がいかに強力であるかを述べた。また、この方法の興味ある発展として熱浴につかっただ準位交差系の問題を報告した。熱浴との相互作用のないときはランダウ・ジーナ理論にしたがって終状態へ分岐するが、熱浴との相互作用が増すにつれて、透熱的な振る舞いが強調されることを述べた。

接触型原子間力顕微鏡の一種である摩擦力顕微鏡の原理を述べ、荷重を増加してゆくと保存力領域から非保存力へと像の変化が見られる事を、グラファイトについて例を用いて概説した。後者はマイクロなスティックスリップ過程の画像表現としてよく理解できる事を、数値シミュレーションと実験結果との良好な対応を基礎にして述べた。非保存力領域では明領域と暗領域の間の不連続な境界線が生じているが、この境界線の両側では探針先端原子が隣り合う異なる凝着領域にあり、ちょうどこの境界上でスリップがおこる。したがって摩擦力顕微鏡像は表面上の凝着領域をカンチレヴァーの変形によって、変形拡大して写像したものになっている。これからマイクロな摩擦のプロセスを実空間像として、読み取ることができる。最後に最近、原子分解能が得られることで注目されている非接触原子間力顕微鏡について述べ、特にカンチレヴァーの振動エネルギーの散逸が、表面のマイクロな力学的性質を反映する量である事を述べた。散逸量を画像化すると表面のナノ力学的な性質の興味深い知見が得られると予測される。

吸着膜の摩擦とスリップ現象

電気通信大学電気通信学部 鈴木 勝

固体基板に吸着した分子層数層程度の吸着膜の摩擦現象は、吸着膜の構造と摩擦力、また固体基板や吸着分子の性質と摩擦力の関係を調べることにより、マイクロな摩擦のメカニズムを知る手がかりとなる。

これまで、実験技術的に吸着膜の摩擦力を測定することは困難であったが、近年、(1)水晶振動子のマイクロバランスによる方法と(2)超音波による方法の2つの方法により吸着膜の摩擦の測定が報告されている。前者の方法を用いて、Krimらは金属基板上の希ガス原子等についていくつかの重要な報告を行なっている。

これら吸着膜に働く摩擦力の測定は、固体基板を振動させ、そのときの吸着膜の機械的応答が基板振動に与える影響を通して基板と吸着膜との間の摩擦力を測定する。吸着膜に働く摩擦力が粘性摩擦であるとき摩擦力 F は、 $F=(\rho/\tau)V$ と表される。ここで、 V は基板と吸着膜との相対速度、 τ はスリップ時間であり、基板と吸着膜との間で運動量を受け渡すのに必要な緩和時間である。一般に基板振動の周期に対して運動量を受け渡す時間（スリップ時間）が長くなると、吸着膜は基板振動に追従しなくなり吸着膜の摩擦力が小さくなる。

Krimらのマイクロバランスによる金属基板上の希ガス原子等の報告は、次の3点に要約される。(1) 摩擦力は基板と吸着膜との相対速度に比例する粘性摩擦である。(2) 不整合固相の吸着膜と液相の吸着膜では、不整合固相の摩擦力が小さい。(3) Pb上のN₂吸着膜の実験では、Pbの超伝導転移に伴う摩擦力の飛びが観測される。

我々は、吸着原子としてヘリウムを用いて、マイクロバランスと超音波による方法の2つの方法で吸着膜の摩擦力の測定を行なっている。ヘリウム吸着膜は、これまでにいくつかの吸着基板について温度や吸着量の関数として吸着膜の構造等が調べられている。そして、温度や吸着量を制御することで、整合固相、不整合固相から液相までと容易にさまざまな構造を得ることができるという特徴がある。超音波による方法では、固体基板に2次元多孔質物質のヘクトライトを用いた。測定の結果、ヘリウムを1層以下の吸着量において高温では摩擦力が大きく、低温では摩擦力が非常に小さくなることを見いだした。これはヘリウム吸着膜が低温では固相的であったものが、高温では液相的となり、吸着膜の密度のゆらぎが大きくなったために摩擦力も増加したと考えることができる。マイクロバランスによる方法では、In上のヘリウム吸着膜の実験を行なっている。その実験結果を図1に示した。縦軸はマイクロバランスの共振周波数であり、吸着膜の摩擦力が小さくなると共振周波数は増加する。図より、Inが超伝導に転移すると共振周波数が増加しており、超伝導転移に伴い摩擦力が減少することを示している。超伝導転移に伴う摩擦力の減少は、Pb上のN₂吸着膜でも見いだされているが、In上のヘリウム吸着膜では緩やかな温度依存性を示しており定性的

に振る舞いが異なっている。

吸着膜の摩擦力の実験的研究は、少数の結果が報告されているのみである。今後、さまざまな系でさまざまな条件のもとで実験が行なわれることが期待される。

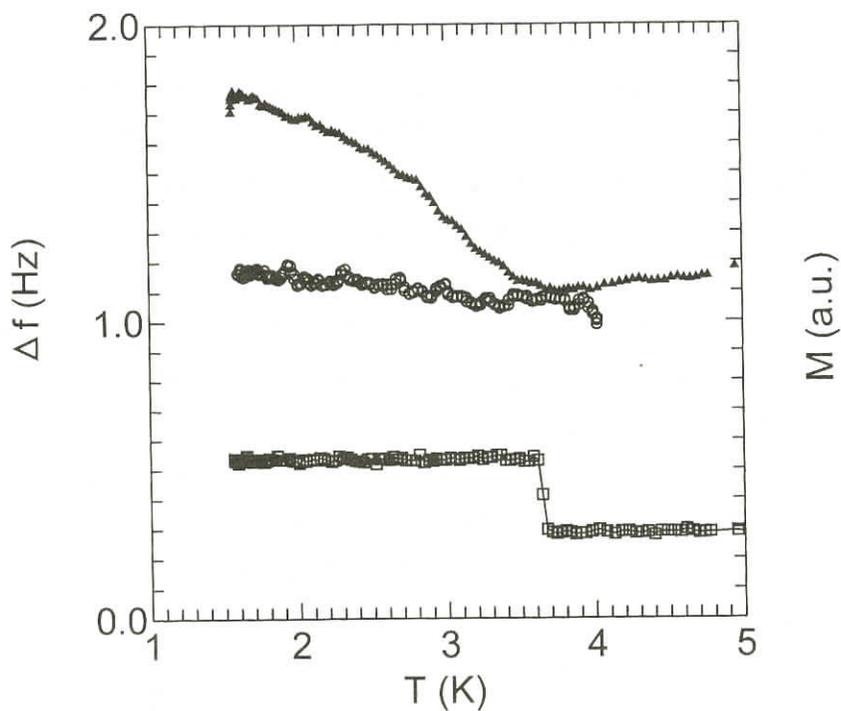


図1：共振周波数の温度変化

○は吸着層のない場合、△はおよそ1.8層の ^4He が吸着している場合のマイクロバランスの共振周波数の変化を表す。□は相互インダクタンスの測定で、飛びは超伝導転移を示す。

2次元メゾポーラス物質ヘクトライト上に吸着したヘリウム膜のスリップ現象

電通大量子 檜 枝 光 憲

鈴木 勝

吸着膜のすべり摩擦の研究は、主にKrimらが水晶振動子(QCM)を用いた測定を行い、数々の成果を報告してきた。その一つとして、希ガス吸着膜がすべり摩擦 $f = \rho_2 V / \tau$ (ρ_2 : 吸着膜の面密度, V : 吸着膜のすべり速度, τ : スリップ時間)を持って基板振動から 10^{-9} sのオーダーでスリップしていることが上げられる。しかし、QCM測定のひとつが窒素温度(77K)で行われており、すべり摩擦の極低温での振る舞いや温度依存性など未解決な問題も多い。一方で、私達は原子スケールで表面が平坦で巨大な表面積を持つ(530m²/g)メゾ多孔体ヘクトライトを用いることで、超音波を使った新しい研究手段を開発した。これは、ヘクトライトからなるペレット状の試料に超音波を伝播させ、音速と音波の減衰(吸収)を測定することで、QCMと同様に吸着膜の基板振動に対する機械的な応答を見るものである。私達は、この超音波測定を行って、0.1~20Kの極低温でヘリウム膜のスリップ現象を研究してきた。

吸着膜の音波振動に対する応答は、スリップ時間によって特徴づけられる。スリップ時間は基板-吸着膜間の運動量移送時間である。スリップ時間が基板の振動周期に対して十分小さいとき、基板-吸着膜間で運動量のやり取りが十分に速く行われ吸着膜は基板振動に追従する。しかし、スリップ時間が基板の振動周期と同程度まで大きくなると、吸着膜は基板振動に追従できずスリップする。吸着膜がスリップし始めると、音速は減少し音波の減衰は大きくなる。

図1に約0.67 layersのヘリウム膜に対して行った10MHzの超音波測定結果を示す。温度が下がるにつれて、音速が急激に上昇し、音波の減衰はピークを作る。これはスリップ時間が温度依存性を持ち、低温側でスリップ時間が大きくなることを示している。つまり、低温側ですべり摩擦が急激に小さくなり、ヘリウム膜がスリップしている。また、図2の実線と破線で示されるフィッティングの結果は、スリップ時間の温度変化がアレニウスの式 $\tau = \tau_0 \exp(E/T)$ (E : 熱活性化エネルギー)に従う熱緩和過程であることを示している。また、フィッティングより見積もった熱活性化エネルギーは、0.5 layersをはさんで⁴Heの場合では整合相でおおよそ15K、不整合相でおおよそ3Kの階段状の変化をし、ヘリウム単原子層の吸着構造との強い相関を示した。比熱の測定では、ヘリウム単原子膜中に1~2 K程度の低エネルギー熱励起を観測しており、その吸着量依存性が超音波測定と基本的に一致している。以上より、ヘリウム膜と表面間に生じるすべり摩擦は、膜中の熱励起と関係していると結論される。その熱励起の具体的な候補として、点欠陥などの膜中の熱的な格子欠陥が考えられる。

吸着膜中の格子欠陥が、吸着膜-表面間の摩擦を生む原因であるすると、吸着膜のすべり摩擦の温度依存性は次のように説明される。絶対零度ではヘリウム単原子膜中に格子欠陥は熱励起しない

ので、すべり摩擦は生じない。ある程度温度が高くなると熱的に格子欠陥が励起され吸着膜と表面の間にすべり摩擦を生み、吸着膜は基板表面と一緒に振動する。これは超音波の実験結果を定性的に説明できる。また、過去に行われたKrimらのQCMの測定では、Ag上に吸着したKr単原子膜のすべり摩擦が、固体よりも液体の方が大きくなった。QCMと超音波の実験結果は、単原子膜のすべり摩擦は膜の構造的な乱れに起因していることを示唆している。

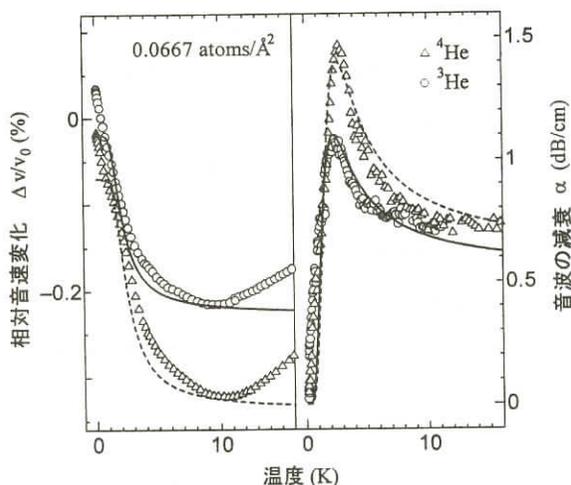


図1 0.67layers 付近の 10MHz 超音波測定の結果。

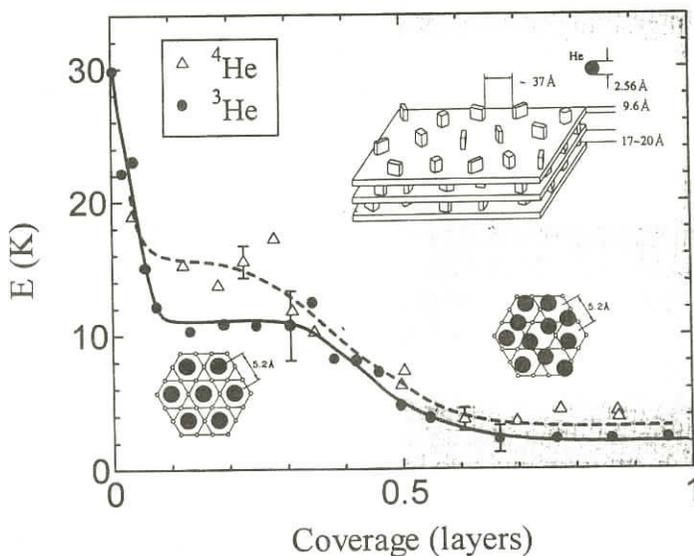


図2 熱活性化エネルギーの吸着量依存

京都大学基礎物理学研究所 関本 謙

There are a group of phenomena where a *critical force* plays an important role. The classical friction with a 'maximum static friction coefficient' μ_{st} , the fracture of materials with a critical 'stress intensity factor' K_{Ic} , the plasticity of continuum bodies or of granular materials with an 'yield stress' σ_y (von - Mises' yield criterion) are typically among them.

On the other hand, some group of phenomena like glass transitions, the static solid - state memory or small and single magnetic domains can be characterized by the existence of a *frozen state* which are only meta - stable in a strict sense.

These two groups of phenomena seems to have some physical essence in common; that is, there exhibits the history dependence, i.e. the *memory* in a general sense, and also the possibility of *resetting* the memory.

These features are simply characterized in terms of the pertinent time - scales; As far as a control parameter or parameters \mathbf{a} of the system is definitively below the critical one, \mathbf{a}_c , the average waiting time of a certain *large* fluctuation which we denote by $\tau(\mathbf{a})$ is much larger than the time - scale of the observation, say τ_{obs} ;

$$\tau(\mathbf{a}) \gg \tau_{obs} \text{ for } \mathbf{a} < \mathbf{a}_c$$

For example in the friction case \mathbf{a} can be the magnitude of the driving force. When the parameter \mathbf{a} , as the function of time, increases beyond \mathbf{a}_c , the thermal excitation becomes effective enough to push the system out of the meta - stable state within the observation time;

$$\tau(\mathbf{a}) \ll \tau_{obs} \text{ for } \mathbf{a} > \mathbf{a}_c$$

Usually the waiting time is a kind of mean first passage time of the activation type $\propto e^{-\frac{E_{ac}}{T}}$ with an activation energy, $E_{ac}(\mathbf{a})$, which can be much larger than the temperature T (with $k_B \equiv 1$), and the transition from $\tau(\mathbf{a}) \gg \tau_{obs}$ to $\tau(\mathbf{a}) \ll \tau_{obs}$ looks very sensitive to the parameter \mathbf{a} [1] (For more than two components of \mathbf{a} the critical condition $\tau(\mathbf{a}) = \tau_{obs}$ is replaced by a hyper surface in the \mathbf{a} -space.)

In short, the common concept is the *change of the order of time - scales*, and the study of this subject requires to consider the time - dependent time - scales (see Fig.1).

In order to have a rough idea of this concept, we illustrate a simple case of double - well potential. In **A** the state point (the thick dot) is trapped within a left well. Within the observation time τ_{obs} , The state will practically never go above the energy indicated by the dashed line. In other words $\tau \gg \tau_{obs}$ in **A**. In **B**, the temperature or some other parameter is

changed so that this limiting energy is raised above the potential barrier. The state point then moves frequently between the two wells within τ_{obs} . In C, on the other hand, the bottom of the left well is raised so that the thermal activation within τ_{obs} likely to move the state point across the barrier. The process $A \leftrightarrow B$ is relevant to the glass transition, while the process $A \leftrightarrow C$ is related to the friction or plastic flow phenomena. Note that both these processes are intrinsically irreversible in the sense that they can, by definition, never be made quasi-static.

We discussed two topics concerning the subjects described above; In § 2, the framework of the energetics of the thermally fluctuating world[2] was presented. By this framework, which we tentatively call stochastic energetics, we could analyze the work and the *heat* in the course of a particular single process depicted in Fig. 2. In § 3, a common phenomenological framework for glass transition[3] and friction was given which may anticipated from the above figure. This is still quite premature and simple but may serve to understand both phenomena in the same footing and also suggests the natural state variable of glass. In the concluding section § 4, we discussed the possible experimental studies suggested by the consideration given in § 2 and § 3.

References

- [1] Another not unrelated cause of the sensitivity to the parameter observed in the friction, plasticity, or fracture phenomena comes from the concentration of the stress/strain into microscopic regions.
- [2] K. Sekimoto, *J. Phys. Soc. Japan* **66**, 1234 (1997), K. Sekimoto and S. Sasa, *ibid*, 3326, K. Sekimoto, *Progr. Theor. Phys. Suppl.* **130** 17-27 (1998).
- [3] L. Leibler and K. Sekimoto, *Macromolecules* **26**, 6937 (1993).



Fig 1: The change of the order of time-scales. The axis is the logarithmic time.

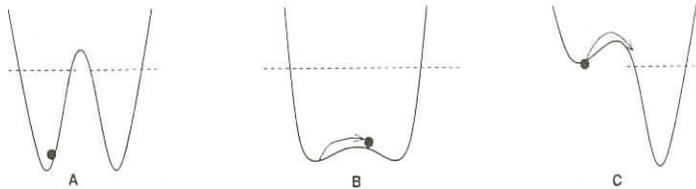


Fig 2: Double-well potential. The horizontal dashed lines above the well(s) indicate the energy high above which the thermal activation is unlikely to move the state point from the bottom within the observation time τ_{obs} .

高配列化有機単分子膜表面の滑り摩擦への計算的アプローチ

東京工業大学生命理工 大園 拓哉
藤 平 正道

原子間力顕微鏡の発達にともないその応用としての摩擦力顕微鏡がナノトライボロジー研究の主流となってきています。その分解能の高さにより原子分子レベルでの摩擦現象が捉えられ摩擦の素過程の理解が深まりつつあるなか、我々の研究室ではこの手法を用い、様々な材料表面の摩擦特性を調べています。特に、有機分子が高配列化した有機薄膜（例えば、金上のアルカンチオール自己組織化単分子膜やラングミュアプロジェクト膜）を扱っており、この分野は潤滑作用や生体内摩擦の基礎として重要であります。このような有機薄膜は構成する分子の構造を様々に変えることができ、その化学的、物理的性質と摩擦との関係付けが期待されています。しかしその結果の理解に対しては議論が続いています。

このように局所的な現象では関係する粒子数が少なく分子動力学法などの計算による系のシミュレーションが可能となり、その結果、実験結果の深い理解につながると期待されます。そこで我々の扱っている高配列化単分子膜の摩擦の分子動力学計算実験を行いその挙動を調べた例を報告致します。

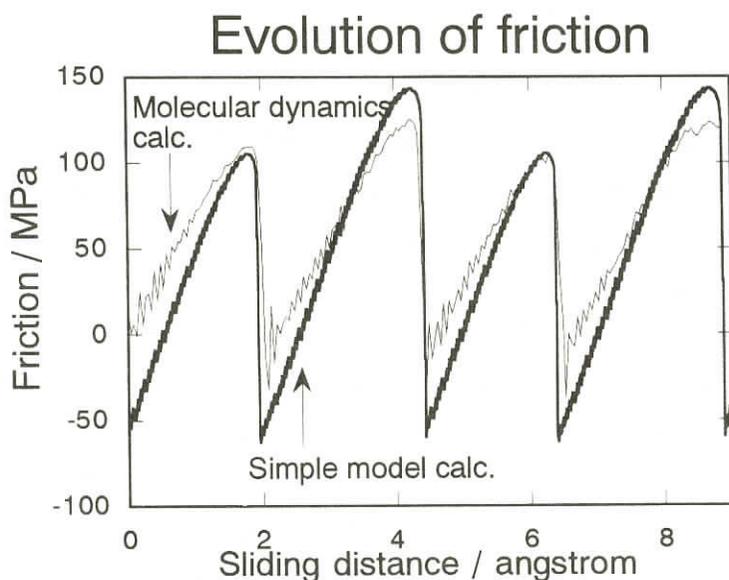
単分子膜として直鎖アルカンを連続体基板に規則正しく並べ、分子の基板側の端を基板に結合したものを仮定します。その膜を2つ用意し、表面どうしが接触するように面を合わせ、2次元周期境界条件で展開します。滑り摩擦の状態は下の膜に対し上側の基板を横方向に移動させることで表現されます。そのときの摩擦力は膜間の滑り方向の力の成分となります。その結果は図に示してありますが、分子の周期的並びに対応したスティックスリップ現象を表わすものとなりました。これは上下の膜は同等のものであるためその格子の整合性のために現われたと考えられます。このスティックスリップ現象は摩擦力顕微鏡の結果でもよく観測されていますが、これが、この計算の系のように整合性を持つ表面どうしの接触によるのか、単原子（または数原子）と規則正しい格子を持つ表面との接触によるのかははまだ議論が続いています。前者の立場で話を進めると、摩擦が線形に上がっていくスティック過程では分子が直鎖を保ったまま根元から集団的に傾いていきます。この時、膜系には摩擦エネルギーが蓄積されていきますが、そのエネルギーの殆どはレナードジョーンズポテンシャルで表わされる比較的弱い相互作用項の変化であることがわかりました。突然摩擦力が下がるスリップ過程ではその蓄積されたエネルギーを使って、まず分子が傾きを回復しつつ集団的に振動しフォノンを励起します。その振動はやがてランダムになり熱となって散逸されていく様子が観測されます。次にこの過程を単純に理解するため低次元化したモデルをたてます。それはトムリンソンの独立振動子と数学的には同等なもので、周期的なポテンシャルと調和ポテンシャルの足し合わせで摩擦の準静的挙動を記述するものです。前者は表面の原子の並びによる三角関数的なもので、表面の化学種や格子間隔などに依存します。後者は膜のせん断弾性変形に対する

調和型のもので、これは膜の硬さのような性質を表わします。これもまた構成分子の化学種や配列に依存します。このモデルで特徴的なのは後者を取り扱ったことで、これはこの有機単分子膜系は無機材料にくらべ柔らかいため材料の変形を考慮しなければならないためです。このモデルで計算した同様な系の摩擦変化も同様に図に示しましたが、この結果は分子動力学計算のものと非常に合っていることがわかります。エネルギーなどの他の諸量も同様に良い一致を示しました。このモデルでは膜の化学的、物理的性質から摩擦挙動を半定量的に予測できることが期待されます。

現在、分子動力学計算とこのモデルに対し、実験との対応という点で改良を加えている状況です。

References

- [1] T. Ohzono, J. N. Glosli and M. Fujihira, Jpn. J. Appl. Phys. 37 (1998) 6535.
- [2] T. Ohzono, J. N. Glosli and M. Fujihira, Jpn. J. Appl. Phys. 38 (1999) L675.
- [3] M. Fujihira and T. Ohzono, Jpn. J. Appl. Phys. 38 (1999) 3918.



弾性格子のスライディング摩擦と特異なピン止め

島根大学教育 川口高明

大阪大学理 松川宏

これまで我々は固体界面に生じる摩擦力を弾性格子モデルに基づいて、計算機シミュレーションおよび解析的方法により調べてきた。以下にいくつかの結果の概要を述べる。

主に用いたモデルはFrenkel-Kontorova(FK)モデルにおける周期ポテンシャル部分を離散弾性格子で置き換えたもの(拡張FKモデル)で、これに格子間相互作用を導入している。これまで不整合1次元系を中心にその摩擦現象を調べてきた。FKモデルにおいて、不整合条件下ではある種の摩擦転移(Aubry転移)が発生し、最大静摩擦力がゼロまたは有限の状態が存在する。これは格子のピン止めの有無を意味している。拡張FKモデルでもこのようなAubry転移が存在することが明らかになっているが、そのピン止め現象にはFKモデルには見られない非常に特異な振る舞いが現れる。それは2つの弾性格子によるピン止めの競合効果に起因する。これにより弾性パラメータ等の変化に対して格子に連続的構造相転移が発生し、それに伴い最大静摩擦力が複雑に変化し、ある条件下では消失する。

上記の静止状態に外力を加えて格子がスライディングを始めると散逸が生じ、有限の動摩擦力が現れる。その大きさや速度依存性は、最大静摩擦力の大きさや格子の弾性パラメータ等で決まる。最大静摩擦力がゼロまたは非常に小さい場合、動摩擦力は速度に依存する。その場合、動摩擦力は摂動計算でも定量的に求めることが可能であり、最低次の計算では特に2つの格子の動摩擦力への寄与がそれぞれ分離して理解できる。一方、最大静摩擦力が有限で大きくなると、低速度域の動摩擦力の速度依存性は弱くなり、速度に依らない動摩擦力が現れる。

次に、2次元FKモデルにおいて周期ポテンシャルに加えて不純物ポテンシャルをランダムに分布させ、その場合の弾性格子の示す最大静摩擦力、動摩擦力およびスライディング過程の格子周期性と横方向外力に対する応答を調べた。その結果、スライディング過程での格子は異方的かつガラス的に乱れた状態を示し、その状態は第2種超伝導体中vortex格子系等のスライディングに関して議論されているMoving transverse glass またはMoving Bragg glass状態に対応していることが、構造因子と動摩擦力の解析から明らかになった。このガラス状態に対してスライディング方向に対して横方向のピン止めの存在が理論的に予想されるが、我々はそれを確認して、さらに不純物ポテンシャルのみ存在する場合の横方向depinning 臨界外力値のスケーリング理論に従った振る舞いを見出した。そして固体界面における下地格子による周期ポテンシャルが存在する場合には、この横方向のピン止めに対して上記スケーリング領域から周期ポテンシャルに支配された領域へのクロスオーバーが生じることも明らかにした。

参考文献

- [1] H. Matsukawa and H. Fukuyama, Phys. Rev. **B49**, 17286 (1994) and in *Physics of sliding friction*, B. N. J. Persson and E. Tosatti eds., (Kluwer Academic Publishers, 1996).
- [2] T. Kawaguchi and H. Matsukawa, Phys. Rev. **B56**, 4261 (1997); **B56**, 13932 (1997); **B58**, 15866 (1998) and in *Slow Dynamics in Complex Systems*, M. Tokuyama and I. Oppenheim eds., (AIP, 1999).
- [3] T. Kawaguchi and H. Matsukawa, to appear in Prog. Theor. Phys. Suppl. No. 138 (2000) and in preparation.
- [4] H. Matsukawa, T. Kawaguchi and H. Fukuyama, in *Proc. of the Int. Workshop on ELECTRONIC CRYSTALS 99*, S. Brazovski and P. Monceau eds.

分子動力学法を用いた弾性接触動摩擦現象の解析

A Molecular Dynamics Approach for a Law of Sliding Friction

原 岡 和 生

金沢工業大学 林 啓 治

千歳科学技術大学 川 合 敏 雄

< 動機[1] > 近年、素子の微細加工技術が進んでいる。微細化した機構部品において、大きさがサブミクロンオーダー以下になると、真実接触面積と見かけの接触面積が等しくなってくる為、マクロな動摩擦系の場合と根本的に異なってくる。また、動摩擦現象はエネルギー効率を左右する重要な因子であると同時に、動摩擦による発熱は劣化を促進する。我々は、動摩擦特性をもつ材料の開発への応用を目指した基礎研究として、弾性接触条件下での動摩擦現象にみられる普遍的な法則性を、分子動力学法を用いて数値実験により調べている。

< 2次元モデルの解析[2] > 本研究では弾性接触摩擦系の原子論的な単純化した二次元MDモデルを用いた。すべり摩擦を行う2つの物体は共にLennard-Jones相互作用をする原子から成り立ち、相互作用強度によって界面と物体内部を区別する。但し、現象論的な散逸項や、温度一定の方法を用いることは敢えて避けた。定常的なすべり速度を与え、様々な実験条件の下で計算を行い、系統的に弾性接触条件下で発生する動摩擦力を調べた。その結果、滑り速度と動摩擦力は、線形関係ではなく閾値(ピーク)を持つ事を示した。また、加重と動摩擦力の関係から、動摩擦は原子間相互作用の斥力のみならず引力からも生じる事が判った。

次に摩擦によるエネルギー散逸過程のフォノンモード依存性を調べるために、質量のみ重い同位体をいれた解析を行った。同位体層の界面からの距離をパラメタとすると、界面から近いほうが閾値でのピーク値が低減されるという結果を得た。これは上記の閾値近傍のすべり速度での強制振動に共鳴するノーマルフォノンモードが減少している為と解釈できる。

<1次元モデルの解析[3]> 更にモデルを単純化し、4次の非線型項をいれた一次元非調和格子系の一端を固定し、もう一端を周期的にKickする(δ 関数的に外力を印加)というモデルを用いて定常摩擦を模した。kickされる粒子は界面粒子と考えることができ、kick周期は、すべり速度と見なすことができる。格子系への蓄積エネルギーを、kick周期と粒子数をパラメタとしたマップを作り調べた。その結果、系に蓄積されるエネルギーが顕著に多い場合が存在するが、マップ上のどこに出現するかの規則性は見出せない。

そこで、各々の場合のkickされる粒子(界面粒子)の挙動に着目し、kickされる瞬間前の位置-速度相関(位相図)を調べた。この位相図においては、殆どの場合でドーナツ型の周期的な軌跡を描く。しかし、ドーナツ型と異なる挙動を示す場合があり、その出現を上述のマップと重ねると、蓄積エネルギーが大きい場合と、一致することが判った。

これは、摩擦する物質の界面と内部で、摩擦に関する機能分化が行われている可能性を示唆していると考えられ、現在、より詳細の解析及び検討を行っている。

参考文献

- [1] すべり摩擦の過去の大成として B. N. J. Persson "Sliding Friction", Springer - Verlag (1998)
- [2] Keiji Hayashi et al., Prog. of Theor. Phys. Suppl. No.138(Y2K)(to be published) 及び Keiji Hayashi et al., "Precision Sci. and Tech. for Perfect Surface", JSPE pp. 1001(1999)
- [3] Kazuo Haraoka et al., Prog. of Theor. Phys. Suppl. No. 138(Y2K)(to be published)

粉粒体の運動と摩擦

九州工業大学工学部 那須野 悟

「粉粒体」とは、砂や穀物のようなマクロな粒子の集団のことであるが、粉粒体の振る舞いを物理的視点から眺めてみるといろいろと不思議なことがある。例えば、円筒容器に2種類の粉粒体を入れて容器をぐるぐると回すと、混ざるところか、容器を回せばまわすほど2つの粉粒体は見事に分離してしまったりするし、容器を上下に揺ると、重いはずの粒子の方が軽いはずの粒子より上方に浮かび上がってきたりということが起こる。このようなことは、ミクロな粒子集団の振る舞いに根ざした現在の統計力学の枠組みでは到底理解することはできない。構成要素がミクロな粒子ではなくマクロな粒子であるが故に、熱的ゆらぎは殆ど意味をなさなくなり、また、粒子間の相互作用には不可避免的に「摩擦」などによる散逸が生じてしまうからである。さらに、困ったことに、粉粒体の運動を個々の粒子の相互作用のレベルから解析しようとする、粒子間の「摩擦」をどのように導入したらよいかの明確ではないことに気がつく。このように摩擦は、粉粒体の示す特異な振る舞いに非常に重要な役割を果たしていると同時に、それが故に、物理的取り扱いを難しくしているのである。

一方、粒子レベルからのアプローチを諦め、粒子の集団的振る舞いを現象論的に扱おうとすると、今度は上に述べた粒子間の摩擦とは異なるレベルでの「摩擦」が顔を出すことになる。たとえば、乾いた砂をばらばらと地面に落として砂山をつくると、斜面の傾きがある臨界角 θ_r 以上になると不安定になりなだれが生じることは日常良く経験することである。Coulombは、それを粉粒体の摩擦特性と関連づけて議論することにより $\tan \theta_r = \mu$ という有名な関係式を導き出しているが、この式に現れる μ は、粉体粒子の集団としての振る舞いを繰り込んだ形でのマクロレベルにおける実効的最大静摩擦係数であると考えられる。実際、同じ粉粒体を使って砂山をつくっても、作り方が異なると θ_r も微妙に異なることが知られている。このことは、粉粒体の応力に対する「強さ」が、粉体粒子間のミクロレベルでの摩擦によるだけではなくて粒子同士の相互配置の仕方（詰まり方）にもよることを意味している。このように粉粒体に剪断応力を加えたときに現れるマクロレベルでの摩擦は、いわゆる乾燥摩擦や境界摩擦と呼ばれる通常の摩擦系とは異なり、その担い手がマクロな散逸粒子であるという点で興味深い。

そこで、筆者らはこのような剪断応力下の粉粒体の振る舞いを調べるために、粉粒体を2枚の板の間に挟んで上の板をバネを介して駆動するという実験を行った。その結果、(1)粉粒体層の上部境界層領域が周期的に流動化と固相化を繰り返すことによるstick-slip運動が生じること、(2)そのときの摩擦力は滑り速度に対して多価関数となること、(3)slipのダイナミクスは駆動速度に依らないこと、(4)最大静止摩擦は決して常数ではないこと、などが明らかとなった。詳しくは下記文献をご覧ください。

参考文献

- [1] W. Losert, J. - C. Geminard, S. Nasuno and J.P. Gollub, cond - mat/9909330.
- [2] S. Nasuno, A. Kudrolli, A. Bak and J. P. Gollub, *Phys. Rev. E* **58**, 2161 - 2171 (1998).
- [3] S. Nasuno, A. Kudrolli and J. P. Gollub, *Phys. Rev. Lett.* **79**, 949 - 952 (1998).
- [4] 那須野悟, トライボロジスト **44**, 778 - 784 (1999).
- [5] 那須野悟, 日本物理学会誌 **53**, 775 - 778 (1998); 物性研究 **71**, 506 - 514, 596 - 597 (1998).

粉体摩擦の理論とシミュレーション

京都大学大学院人間・環境学研究科 早川 尚 男

本講演では粉体の摩擦について理論的, 数値的研究を紹介した。粉体に関しては最近解説や論文集が出たのでそれなりに認知されて来た[1,2]。

重力下の粉体摩擦現象等ではずり応力をかけても降伏応力を越えない限りは粉体層は動かず固体の様に静止している。ここで降伏応力を持ったBingham 流体の様なレオロジカルなモデルを導入し, 現象を説明しようとするよりも詳細に現象を観察した方が得るものが多い。実際, この現象では応力鎖が重要な役割を果たしており, その鎖がずり応力を打ち消すだけの反発力をもたらす。ある閾値を越えると鎖は切れて最早固体的な状態を維持できない。例えば粉体層の上に板をおき, 板をモーターとばねで繋ぎ, モーターによって一定のずり速度をかけるという簡単な実験で粉体摩擦の持つきれいな性質が明らかになる。特に駆動速度が低速であると静止とスリップを繰り返すスティック・スリップ現象が生じ, その際に様々な物理法則があるであろうことが分かって来た[3]。このスティック・スリップ現象のうちスティック状態は応力鎖が底と板の間に生じてずりに対する抵抗力となっていることや, スリップがその応力鎖の破壊によって生じていることが, 筆者のDEM(離散要素法)のシミュレーション等では一目瞭然となった[4]。こうした現象を動的相転移と捉えて現象論を作る[5]のはそれほど難しくなく, 多くの実験結果を説明することに成功した。しかしながらそれを粉体のマイクロなプロセスと結びつけて定量的に議論しようとする一挙に難しい問題になり, その点については今後の課題となっている。

参考文献

- [1] 西森拓, 早川尚男, 田口善弘 編集: 粉粒体の物理学 (物理学論文選集XI), 日本物理学会 (1999)
- [2] 早川尚男, 那須野悟: '粉体の物理', 共立出版 (物理学最前線) 印刷中
(<http://ace.phys.h.kyoto-u.ac.jp/hisao/jpapers/zensen.pdf>)

- [3] S. Nasuno, A. Kidolli, A. Bak and J. P. Gollub: 'Time - resolved Studies of Stick - Slip Friction in Sheared Granular Friction', Phys. Rev. E **58**, 2161 - 2170 (1998)
- [4] H. Hayakawa: 'Simulation of Granular Friction and its Effective Theory': to be published in Prog. Theor. Phys. Suppl. See also 早川尚男: '粉体の摩擦のモデル化とシミュレーション', 1999 年度粉体工学会春季研究発表会講演論文集 124 - 128
- [5] H. Hayakawa: 'Simple Model for Granular Friction' :Phys. Rev. E **60**, 4500-4504 (1999)

スリッ プ モデル

Doiプロ (アルバイト) 佐藤 勝彦

汎用的と思われるスリッ プモデルを提案する。

地震であれ粉体であれスリッ プ・スティックが起こるシステムは、模式的には図(1)のようなものである。そして、滑べりを起こす界面の詳細をイメージした時、そこでは界面を構成している要素同士は強い結合とその欠損とを繰り返しているだろう。それをモデル化すると図(2) (2つの平行な板にはさまれたバネの集団を考え、バネは確率的に接着剥がれを繰り返している。バネは要素間の力のやりとりの象徴である) のようになる。

図(2)を数式化すると以下ようになる。

システムはくっついているバネの伸びの分布 $\Psi(x,t)$ ととれているバネの伸びの分布 $\Phi\Psi(x,t)$ とで完全に記述される (x はバネの伸び, t は時間)。

バネの総数はいつも同じであるという自然な要請から、任意の時間 t に置いて

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Psi(x,t)dx + \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(x,t)dx = 1 \tag{1}$$

が成り立つ。次に $\Psi(x,t)$ の発展方程式を以下のように決める。

$$\frac{\partial \Psi(x,t)}{\partial t} = -\kappa(t) \frac{\partial \Psi(x,t)}{\partial x} - \frac{\Psi(x,t)}{\tau_-(x)} + \frac{\Phi(x,t)}{\tau_+(x,\kappa(t))} \tag{2}$$

第一項は板の動きにともなうドリフト項であり、第2, 3項は確率的にとれる、くっつくを表現したものである。「伸びているバネほど取れ易い」や「板が速く動いている程くっつきづらい」などの性質をシステムが持っていた時も対応できるように τ_{\pm} は一般に x, κ に依るとする (κ は滑べり速度)。

次に $\Phi(x,t)$ の発展方程式を決めるべきであるが、 Φ には発展式を与えずに

$$\Phi(x,t) = f(x,\kappa(t)) \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(x',t)dx' \tag{3}$$

であるとする（ここに f は $\int_{-\infty}^{\infty} f(x, \kappa) dx = 1$ を満たす x, κ のある関数）。式(3)は取れた後のバネの伸びの緩和が他のタイムスケール $(\tau_{\pm}, \frac{\kappa}{k})$ に比べて十分速いということを表現しているものであり、多くの系で成り立っていると期待するものである（式(3)についてのもう少し詳しい解説は文献[1]）。

この式(1)–(3)で Ψ, Φ についての式は閉じる。すなわち物理的に妥当な τ_{\pm}, f と初期条件が与えられ、滑べり速度 κ の時系列が与えられた時、 Ψ, Φ は一意に決まる。

Ψ, Φ がきまった時、応力 σ は

$$\sigma(t) \equiv n_0 \int_{-\infty}^{\infty} a(x)(\Psi(x, t) + \Phi(x, t)) dx \quad (4)$$

となる（ここに $a(x)$ はバネが x 伸びた時の力、 n_0 は単位面積あたりのバネの数）。

このモデルは、物理的に τ_{\pm}, f, a が与えられたなら、応力 σ を滑べり速度 κ の汎関数として一意的に与える。

参考文献

- [1] K. Sato: Prog. Theo. Phys. **102**(1999)37-50

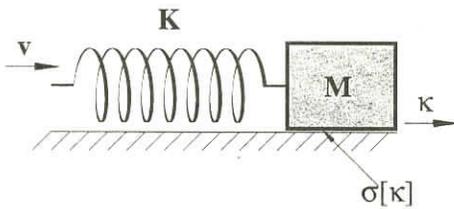


図 1



図 2

すべりの多体 disk 模型 — 介在物があるすべり現象 —

福井大学工学部知能システム工学科 平田 隆 幸

すべり面間に介在物があるすべり現象をモデル化したすべりの多体 disk 模型の研究をおこなった。すべり面間に介在物が存在しないフレッシュな表面でも、繰り返しすべりをしている間に表面が磨耗し、介在物が生じる。例えば、地震断層に存在する断層破砕物や断層粘土はその典型例である。さて、これらのすべり現象では、介在物が重要な役割を果たすと考えられる。この介在物を2次元のdiskによってモデル化したものがすべりの多体 disk 模型である。

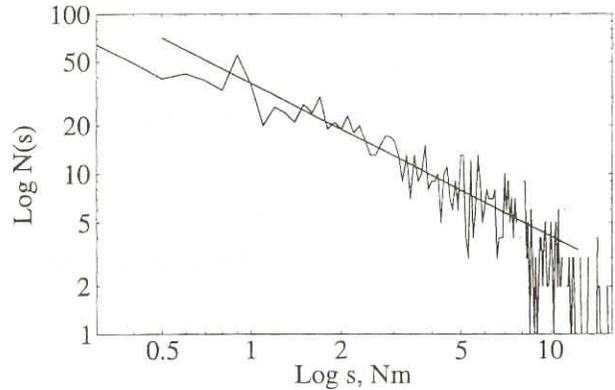


図1 : Stick-slip イベントのサイズ分布

直径140mmの回転する外側の円筒とトルク計測がおこなわれる固定された直径90mmあるいは70mmの内側の円筒によって構成される円環セルに（内側の円筒の直径を変えることによって、円環セルに詰め込む disk 層の厚さを変えることができる）、多体 disk として直径8mm 高さ10mmの亚克力製の円柱を百数十個ランダムに充填し（充填密度 0.74 ~ 0.76）、内側の円筒でトルク時系列を計測する実験をおこなった。

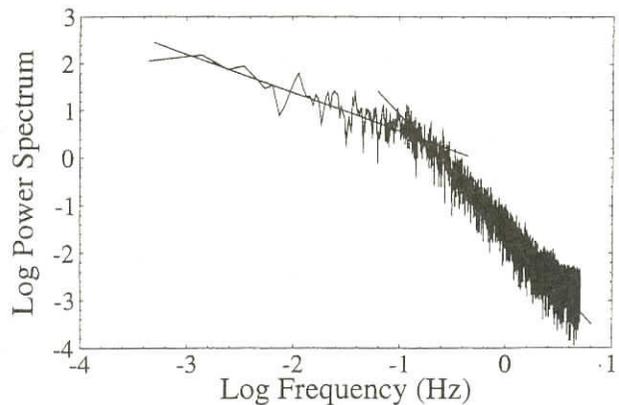


図2 : トルク時系列のパワースペクトル

一定速度(角速度 1/80 Hz)で外側の円筒を5000秒間回転させて得たトルク時系列を解析した結果、1784個の stick-slip イベントが見つかった。この stick-slip イベントのサイズ分布を調べた。図1に、両対数グラフに、stick-slip イベントのサイズ s に対してその発生個数 $N(s)$ をプロットしたものを示す。両対数グラフ上でのプロットは直線を示し、stick-slip イベントのサイズ分布は、 $N(s) \sim s^{-a}$ ($a = 0.93 \pm 0.07$) のべき乗法則に従っていることがわかった。

また、トルク時系列のスペクトル解析をおこなった結果、 $S(f) \sim f^{-\alpha}$ であることがわかった。ここで、 f は周波数、 $S(f)$ はパワースペクトラムである。両対数グラフに、周波数 f に対しパワースペクトラム $S(f)$ をプロットしたものを図2に示す。0.0002~0.2 Hzの範囲で傾き $\alpha = 0.82 \pm 0.05$ をもった直線関係を示すことから、すべりの多体 disk 模型で得られたトルク時系列は、 $1/f$ ゆらぎをもつことが分かる[1]。

[1] T. Hirata (1999) J. Phys. Soc. Jpn., **68**, 3195 - 3198.

多重 Rayleigh 振動子と地震活動

北海道大学理学研究科地球惑星科学 前田 亟

多くの地震は地殻内ブロック間の相対運動である。この運動は摩擦により制御されている筈であるが、その物理的機構が分っているとは言えない。実験を行って理解を深めることは困難で、経験的に構成則を探している段階であり、非弾性的挙動については殆ど理解が進んでいない。

一般的に言えば、地震はプレート間の相対運動による地殻の非可逆的変形の効率的な一機構である。そこで、個々の地震ではなく地震活動というものを考えるとすれば、Onsager の線形非可逆熱力学に基づいた、外力下での連続体の等温変形に関する Biot 理論から出発するのが良からうと思われる：線形系では、熱力学変数の時間変化は形式的に Newton の運動方程式と同じ形に表され、一般に系の応答はバネ、ダッシュポット、及びスライダの組合わせで表せる。しかし具体的な組合わせを表す係数は手で入れなければならない。

ここでは、ダッシュポットを省略し、線形バネと非線形スライダーからなる Rayleigh の stick-slip 振動子 (van der Pol 振動子と数学的に等価) を採用する。この制御変数はスライダーの非線形パラメータと系を起動する“ベルトコンベヤー”の速度(起動速度 a) である。解は a が大きいとき定常滑りで、 a が小さい時リミットサイクルとなる。複数個の振動子を線形バネと通常の線形摩擦で結合しその挙動を解析し、実際の地震活動と比較した。

先ず、運動方程式は deterministic であるから、短期的には解もそうである。しかし、非線形系であるから長期的にはカオティックになる。この様子を、Rayleigh 振動子を2つ繋いだ系の分岐図(図1)で見ることが出来る。起動速度が大きいときの定常滑りと、遅いときのリミットサイクルの間に複雑な分岐状態が現れ、拡大してみると部分的に綺麗な倍周期分岐系列が現れるのが見える。これは近くにカオス状態が存在することを暗示する。

このモデルは特定の起動速度の時、地震の統計的性質 {マグニチュード-頻度についての逆ベキ則 (Gutenberg-Richter) } 及び地震の再来時間の分布則 (これも逆ベキ則) を満足するが、二

つの振動子系では分散が大きい。しかし10個の振動子を隣接間だけの相互作用で結合し周期境界条件を付けた場合では十分滑らかな逆ベキ則が得られる。モデルからはマグニチュードと時間の実スケールが得られないので、この二つの逆ベキ則を利用してスケーリングし、実際の地震発生の時系列と比較する。図2はモデル(白丸)と東北北部の観測データ(黒丸)の比較である。ここで決定されたスケール定数を用いて作ったモデル時系列(実線)と観測データ(破線)を比較した(図3)。

観測データの内、1970-1980の10年間(図3の水平バー、Jan.1/1970は図中央0日に対応)の変化と一致するモデルの時系列期間を選び出した。従って1970年以前と1980年以後において、図から分るように、変化パターンが非常に良く一致していることはこのモデルが短期的には実際の地震活動の良いシュミレータになっている事を示している。あえて話しを飛躍させれば、Rayleigh による stick - slip 運動の定式化は摩擦に関する何某かの真理を含んでいるものと考えられる。

図 1

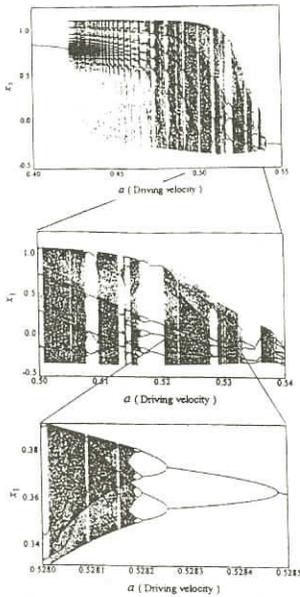


図 2

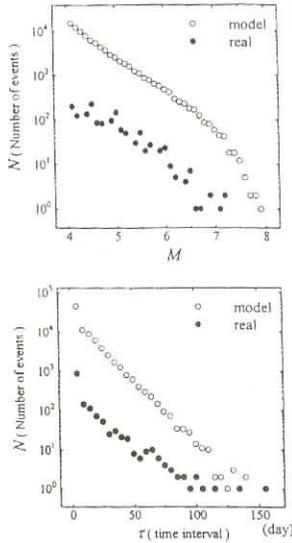
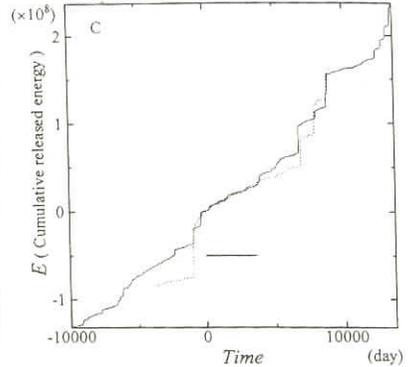


図 3



生体運動を担う分子モーターの仕組み

Mechanism of Molecular Motors in Cell Motility

早稲田大学理工学部物理学科 石渡 信一

筋収縮運動に代表される生体運動は、分子モーターと総称されるメカノケミカル酵素群によって担われている。分子モーターはアデノシン3リン酸（ATP）を加水分解しつつ、その際に解放される化学エネルギーを使ってアクチンフィラメントあるいは微小管と相互作用し、その表面を“滑り運動”する。この種の分子モーターは、全てリニアモーターである。ところが近年、ミトコンドリア膜に存在するATP合成酵素F1-ATPaseが、ATPを分解しつつ回転することが証明された。このことによって、ATP加水分解の化学エネルギーを用いる“回転モーター”の存在が初めて明かになった（従来から知られているバクテリア鞭毛モーターは、細胞内外のpH差をエネルギー源にして回転運動するモーターである）。

筋収縮系を構成するミオシン分子モーターは1分子では機能せず、分子集団で機能する。この種のミオシン分子モーターはフィラメントを形成し、一本のアクチンフィラメントと相互作用して初めて機能する。1分子では、ATP結合と同時にアクチンフィラメントから解離してしまう。一方、細胞内物質輸送を担うキネシン分子モーターは、1分子で微小管表面を一步一步“歩く”といわれている。1分子で機能することができる。

多くの分子モーターは2個の“頭部”からなり、それぞれがATPを加水分解しつつ基質フィラメントと結合・解離を繰り返し、フィラメント表面を一方向に“滑り運動”する。特にキネシン分子モーターのように“歩く”モーターは、単頭結合と双頭結合を交互に繰り返していると期待される。滑り運動の分子機構を明かにする上での当面の目標は、従って、単頭結合-双頭結合の相互変換のタイミングと、ATP加水分解とのタイミングを直接計測し、それらの間の関係を明らかにすることに帰着する。

私達は、キネシン1分子を直径1 μ mのプラスチックビーズに結合し、そのビーズをレーザー光ピンセットで捕捉することによって、キネシン分子と微小管との相互作用（結合力、結合様式）を1分子レベルで繰り返し顕微鏡計測した。得られた結合破断力のヒストグラムは、平均値がそれぞれ7pNと15pNの、2つのピークからなっていた。この結果は、単頭結合と双頭結合が共存すること、つまり互いに平衡関係にあることを強く示唆する。同じことは、ミオシン分子とアクチンフィラメントとの結合についても言えた。さらに、どちらの結合も、負荷上昇速度を上げると、双頭結合での破断の割合が大きくなった。このことは、単頭-双頭結合の平衡は、無負荷においては双頭結合に片寄っているが、ある頻度で単頭結合に変換するので、その頻度の速度よりもゆっくりと負荷を上昇させると、単頭破断の割合が増加するものと理解される。この一連の研究はATPが存在しない条件下でのものだが、分子モーターと基質フィラメントとの結合様式と、その化学・力学条

件依存性についての一断面を明らかにしている。

分子モーターの（無負荷での）最大滑り速度や、速度-負荷関係は、モーターが発生する滑り力と、結合はしているが滑り力を発生していない分子モーターによる抵抗とが拮抗した結果を反映している。このように、滑り運動特性には“分子摩擦”が関与している。今後は、分子モーターの力発生と滑り運動のメカニズムが、それらの立体構造（と変化）に基づいて明らかにされるだろうが、“分子摩擦”のメカニズムについても同じレベルで明らかになることが期待される。

タンパク質分子モーターの滑り速度とタンパク質分子摩擦

九州大学大学院理学研究科生物科学 太和田 勝 久

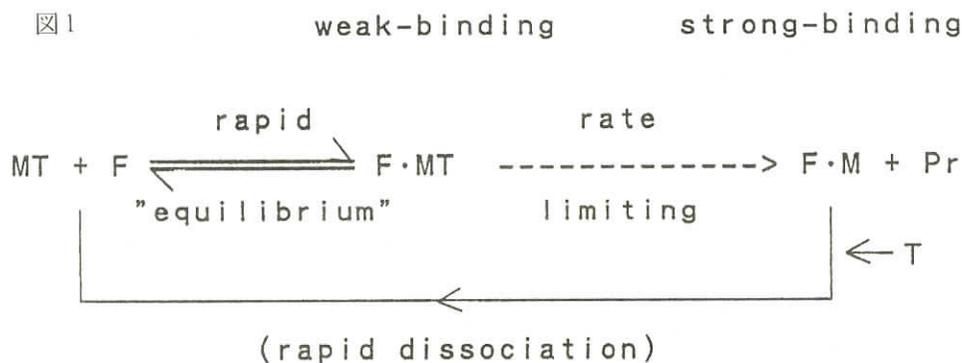
生物分子モーターは、ATPの加水分解を触媒する酵素であるが、ATP分解由来の化学自由エネルギーを用いて、力学的仕事をやる。分子モーターは細胞骨格繊維と相互作用しつつそれとの間で滑り運動を起こす。分子モーターによって生じる滑り運動の速度は、分子モーターの種類によって決まっている。この報告では、分子モーターの滑り速度を決める仕組みについて解説した。

分子モーターには、アクチン（細胞骨格繊維の一つ）との間で滑り運動を起こすミオシン、微小管（他の細胞骨格繊維）との間で滑り運動を起こすキネシン（およびncd）やダイニン等がある。分子モーター（M）と細胞骨格繊維（F）との間で生じる結合・解離反応には、ATP（T）の分解を伴う（だから滑り駆動力の発生を伴う）反応とATP分解を伴わない反応の2種類がある（図1）。細胞骨格繊維と分子モーターの間に相対的な滑り運動のある場合には、後者の結合・解離反応があると、滑り運動のエネルギーの一部が熱エネルギーに散逸する。分子モーターは比較的柔らかいので、滑り運動によってひずみを受けるからである。分子モーターが繊維に結合している時間が滑り速度に依存しない場合には、この後者の結合・解離反応が滑り速度に比例する摩擦を生じる（＝タンパク質分子摩擦）。このタンパク質分子摩擦の大きさは、水の粘性摩擦より数十倍以上大きいので、分子モーターの発生する滑り駆動力に拮抗するのに十分な大きさである。そこで、滑り速度（V）は、

タンパク質分子摩擦係数×V＝分子モーターの発生する滑り駆動力

という等式が成立するような値をとる、と考える。このタンパク質分子摩擦仮説は、*in vitro*滑り運動測定 of 多くの実験結果を統一的に定量的に説明できた。さらに、筋肉収縮の生理学的研究から筋肉内に存在すると推定されていた、筋肉短縮速度を律する因子としての、“粘性”の実体を説明するものでもある。

文献：「トライボロジスト」45巻2号（2000年2月発行）に上記と同名タイトルの総説が載ります。原著論文など関連文献については、この総説の引用文献をご覧ください。



Protein friction
Random movement

Active force
Unidirectional movement

Thermal motion of
motor protein structure

Activated ATPase activity

ペン毛運動とダイニン・チューブリン系化学力学結合

Eukaryotic flagellar motility: Mechanics and chemo - mechanical coupling.

東大・総合文化・生命環境 上村 慎治

Shinji KAMIMURA, Dep. Life Sci., Graduate School of Arts & Sciences, the Univ. Tokyo.

真核生物の繊毛・べん毛は、すべてに共通する「9+2 構造」を持っている。繊維構造となっている周辺微小管と、その上に一定周期で突起構造を形成するダイニンATP 加水分解酵素を主成分とするこの構造は、他にも約200種のタンパク質からなることが報告されている。

べん毛を表面活性剤であるTriton X-100によって処理し細胞膜を除去した後 MgATP を与えることで、屈曲運動を完全に再現できる(Gibbons & Gibbons, 1972) ことから、運動の制御は可溶化されるような酵素や拡散で容易に失われる化学物質の濃度変化によって行われる運動制御ではないことが示されている。細胞体から切り出した場合でも、運動できることから、独立して屈曲運動を行うことのできるマイクロな自動運動ユニットであることがわかっている。屈曲運動の原動力となっているのはATP 加水分解酵素であるダイニンと微小管構成タンパク質であるチューブリンと

の間で起こる滑り運動の結果である。しかし、その運動活性の制御機構に関しては不明な点が多い。

ベン毛運動の大きな特徴は、運動する環境のレイノルズ数が 10^{-4} ~ 10^{-5} と極めて小さく、ATP加水分解によって発生する化学的なエネルギーの大半(>50%)は細胞体の運動よりも、ベン毛の屈曲形成のために費やされる点である。また、粘性抵抗が $1 \sim 1000 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ という極めて広い範囲で、負荷の変動が起こる場合でも、運動制御パターンは破綻することなく維持されることから、外的な負荷の変動には極めて丈夫で巧妙な制御機構を持っているものと考えられる。

ベン毛をタンパク質分解酵素で処理した後にMgATPを与えると微小管の滑り運動を直接観察することができる(Summers & Gibbons, 1973)。この時の微小管繊維間のズリ運動に関わる粘性的な抵抗はダイニンの発生する力[1]に対しては極めて小さいものと見積もられ、実際に、この運動の間に特に大きなATP消費は観察されない[2]。ところが屈曲運動の間は、ダイニンは1サイクル当たり2分子のATPを分解していることが報告されており、運動の負荷の程度に応じたATP加水分解活性の制御が存在するのではないかと想像される。

本研究は、上のような研究背景を元に、運動とATP分解反応との間の連関(化学・力学結合)を解析することを目的とした。そのためにはATP分解反応を1本のベン毛で測定する技術が必要となる。現在、その解析は原理的には可能なものもあるが、ベン毛運動では応用することは難しい。そこで、cagedATPを用いATP濃度を人為的に制御し、そのときに観察される運動を詳細に記述するという手法を採用した。

本研究ではUV落射照明装置を組み込んだ暗視野照明顕微鏡を用いた。この装置によって、急速に(<10msec)ATP濃度を上昇させ、その時ベン毛の屈曲運動がどのように開始するか、すなわち、ATP加水分解反応が屈曲形成制御にどのように関わるかを調べることができる。ATPのない時、ベン毛はライガー波形と呼ばれる硬直状態となる。ATPはこの硬直状態を速やかに解除するものと期待されたが、予想に反してベン毛は硬直状態から速やかに次のスムーズな屈曲運動を再開することが観察された。これはATPの枯渇した場合であっても次の新しい屈曲形成プロセスには何ら影響を及ぼしていないことを意味している。硬直状況であろうと、連続した運動中であろうと、屈曲波形によって刻々とフィードバック制御される機構を仮定することで、この観察結果は説明することができる[4]。

本研究では、さらに、ガラス微小針を使って、微小管滑り運動の力を直接計測する実験を行った。解析の結果、ATP付与後、約10msecの遅延で滑り力が発生することがわかった。ダイニンは結合したATPをまず加水分解し(dynein・ADP・Piとなる)、その後リン酸(Pi)を放出してdynein・ADPとなることが知られている。このdynein・ADPが滑り力を発生すると考えることで、今回の計測結果がうまく説明できる[5]。

同じ装置で、タンパク質分解酵素処理を行わないベン毛を用いた場合、ベン毛はナノメートルスケールの高速微小振動を行うことが報告されている[6,7]。この振動現象はダイニンと微小管との

間の微小な往復滑り運動を反映している[7]。この運動をダイニンの強力な阻害剤であるバナジン酸存在下で観察すると100~200msec以内に完全な運動停止が起こることが観察された。この観察は、一旦形成されたdynein・ADPがdynein・ADP・vanadateの状態となってすみやかに滑り反応を停止すると考えることで、これまでの知見とは矛盾しない。しかし、前述の条件で観察される滑り力の発生には何ら影響しないという不思議な結果となった。これらの観察結果を総合的に考察すると、dynein・ADPには、力発生に関わるものと、バナジン酸に高い結合親和性をもつものと、区別され得る2状態が存在することが強く示唆された[5]。

参考文献

- [1] Kamimura, S., and Takahashi, K. *Nature*, 293, 566-568 (1981).
- [2] Kamimura, S., Yano, M., and Shimizu, H. *J. Biochem.*, 97, 1509-1515 (1985).
- [3] Kamimura, S. *Appl. Optics*, 26, 3425-3427 (1987).
- [4] Tani, T., and Kamimura, S. *J. exp. Biol.*, 201, 1493-1503 (1998).
- [5] Tani, T., and Kamimura, S. *Biophys. J.*, 77, 1518-1527 (1999).
- [6] Kamimura, S., and Kamiya, R. *Nature*, 340, 476-478 (1989).
- [7] Kamimura, S., and Kamiya, R. *J. Cell Biol.*, 116, 1443-1454 (1992).

モーター分子における摩擦論

東海大・開発工・生物工 須田 齋

細胞運動をになう運動タンパク質たちの運動論は、滑り合うタンパク質同士の相互作用界面でのイベントを理解することが究極的な目的である。モーター分子上でATP 1個が加水分解されるとき、いくつかの中間状態を経て、力発生過程を生じ、途中に生成物ADPとリン酸を放出して1サイクルが終わる。結合および解離を繰り返しつつ、モーター分子は、その対となるレール上を移動する。本稿では、移動のスピードは何によって決定されているのかを破断力学の結論に基づいて議論する。

通常、モーター分子は、レール側の重合タンパク質の離散的な結合部位を単位にして移動を行う。たとえば、筋収縮のミオシン分子は、アクチン繊維上を5.5nm ステップで運動することが知られている。移動は、結合を切る過程が重要である。結合の破断は、結合を切る外力と密接な関係にある。そして、外力の指数関数として結合寿命は表される。そこで、モーター分子の発生力は、結合を切るのに必要とされていると考え、ある結合サイトから次のサイトへの移動に要するスピー

ドは、サイト間の距離 L を結合が破断するのに要する時間（その逆数は解離速度）、すなわち結合寿命で割った量である。

レール側のポテンシャルを仮定して、発生力 F がバイアスの作用をしていると考え、次のような速度式 V を得る。

$$V = L (k_+ - k_-) \\ = (L / \tau_0) \exp (U_0 / kT) \sinh (Fd / kT)$$

ここで、 k_+ と k_- はそれぞれ前進方向と後退方向の解離速度である。 τ_0 は、蛋白質の固有振動数、 U_0 は外力がゼロでの固有の結合エネルギー（正確には化学ポテンシャル）、 d は結合が切れるまでに為された実効的な距離、 kT はボルツマン因子である。もし筋収縮系で外的加重 P が作用しているときを想定するならば、そのような場合には、 F を $F - P$ で置き換えれば、速度と加重の関係を与えることができる。

$$V = (L / \tau_0) \exp (U_0 / kT) \sinh ((F - P)d / kT)$$

筋収縮系では、Hill の速度—加重関係式があって、それと上式との比較を行ってみた。すると、標準的な筋繊維の実験を再現するには、 $kT / Fd = 0.262$ がベストであった。つまり、破断に要する仕事は、 kT の約 3 倍のエネルギーがあれば足りることが結論される。これまで報告されているミオシン分子が出す最大の力は、5 pN である。このとき、 T は室温として、 d は約 3 nm である。ライゴール結合において測定された約 3 nm に一致している。

上式では、前進と後退での d を同じと仮定したが、おそらく実際の系では異なり、より非対称なポテンシャルであると考えられる。

熱ラチェットの対称性と流れが発生する条件

東北大工 金 田 亮

佐々木 一 夫

一次元周期ポテンシャル中を運動するブラウン粒子に適当な仕掛けを施すことにより、（マクロなスケールでのポテンシャル勾配がゼロであるにもかかわらず）一方向のマクロな粒子流を生じさせる機構を熱ラチェットと呼ぶ。

ここでは、生体分子モーターの一方方向性の運動の動作メカニズムの一つとして、J. Prost 達 (1994) によって提唱されたタイプの熱ラチェットをとりあげる。このタイプの熱ラチェットでは、ブラウン運動する質点は、複数個の状態 ($i=1, 2, \dots$) を持ち、かつ、その状態間を遷移率 ω_{ij} に従って確率的に遷移するものとする。そして、質点は各状態 i で、それぞれ異なるポテンシャル $U_i(x)$ を感じるとする。これまでの多くの研究では、この周期的ポテンシャル $U_i(x)$ が左右非対称

であることが、粒子の一方方向の流れ発生のために必要不可欠な条件であると考えられていた。

しかし最近、Y. Chen [Phys. Rev. Lett. **79**(1997) 3117] によって、ポテンシャルが、対称な場合でも、一方方向の流れが起きるといふ例が報告された。Chenはそこで、具体的なモデル計算と簡単な推論に基づいて、一方方向の流れが起こるための必要条件は、次の2つの条件を同時に満たす事であると主張した。I. ラチェットを構成するポテンシャルの状態数が、少なくとも三つ以上であること。

II. 遷移にサイクル(循環)が存在すること。(例えば3状態対称ラチェットの場合、遷移率が、 $\omega_{12}\omega_{23}\omega_{31} \neq \omega_{12}\omega_{23}\omega_{31}$ を満たすこと。)

しかし、我々は本研究において、(このラチェット系を記述するフォッカー-プランク方程式を考慮することで、) 一方方向の流れ発生のための新たな必要条件を求めた。そして、その条件からChenの主張を覆す次の二つの例を示した。I. 状態数が二つの対称ポテンシャルのラチェット系でも流れが起こる例。II. 3状態対称モデルで、遷移率にサイクルがなくても($\omega_{12}\omega_{23}\omega_{31} = \omega_{12}\omega_{23}\omega_{31}$) 流れが起こる例。

ちなみに、我々が求めた流れ発生のための必要条件は、以下である：ラチェットを構成するポテンシャル $U_i(x)$ が滑べり鏡映でない事、もしくは、ポテンシャル $U_i(x)$ が全て滑べり鏡映の場合には、遷移に循環が存在すること。(詳細は、J. Phys. Soc. Jpn. Vol. 68 No. 12 (1999) に掲載予定の論文を参照。)

生体細胞の形態変化と運動に伴う力学特性

北大院理 芳 賀 永
川 端 和 重
伊 藤 悦 朗
三本木 孝
新潟大医 牛 木 辰 男

細胞の運動や形態変化は、細胞を構成する骨格、膜、生体分子など多くの構成要素が複雑に関係しあって生じるマクロな協調現象であるため、全体としての振舞いを個々の構成要素の振舞いから予想することが困難な現象である。我々は、個々の要素にはとらわれず、細胞を1つの『非線形非平衡システム』としてとらえ、各部分の局所的な力学量の関係から細胞の運動や形態変化を理解する立場で研究を進めている。

本研究の目的は、生きた細胞の局所的な弾性率を原子間力顕微鏡を用いて測定し、細胞の形態変化や運動と弾性率分布との関係を明らかにすることである。

生きたマウス繊維芽細胞 (NIH3T3) の弾性率分布を測定し、さらに細胞骨格 (アクチンフィラメント, 微小管, 中間径フィラメント) の分布を共焦点レーザー走査型顕微鏡を用いて免疫蛍光観察を行った結果, 以下の事が明らかとなった。

- 1) 弾性率分布に見られる硬い繊維状の構造は, アクチンフィラメントからなるストレスファイバーに対応している。
- 2) 細胞体の核付近は, その周辺部に比べて約10倍柔らかい。
- 3) 細胞の弾性は, アクチンフィラメントだけでは説明できない。微小管や中間径フィラメントなど考慮する必要がある。
- 4) 細胞が運動する際, 運動方向へ伸長する葉状仮足が硬く変化する。

以上のことから, 細胞はアクチンフィラメントが作るネットワークの力学的性質を利用して, 形態を変化させたり運動を行っていることが分かる。

References

- [1] H. Haga, *et al.*, *Biological Physics* (1999) **CP487**, 229 - 234.
- [2] H. Haga, *et al.*, *Ultramicroscopy* (2000) in press.
- [3] 川端 和重, *et al.*, 日本バイオレオロジー学会誌 (1999) **13**, 126 - 134.

磁性体のドメインウォールの運動と量子効果

東大・物工 宮下 精二

磁性体のドメインウォールは, 一般に強磁性イジング模型における Z_2 対称性の破れによるトポロジカル欠陥と考えられる。ドメインウォールの問題はこれまで反磁場によるドメイン構造, 急冷からの秩序生成の過程の磁気構造に関連して議論されてきている[1,2]。ここでは主に, 急冷からの秩序生成を考える。均一系で, 秩序変数が保存しない場合には, k^2t scaling とよばれる \sqrt{t} に比例してドメイン壁が成長することが知られている[1]。

また, 合金の分離過程で現れるドメイン壁のように秩序変数が保存する場合にはより小さいべきに依存することが知られている[2]。蜂の巣格子強磁性イジング模型は均一系に関わらず, ドメインの運動に励起エネルギーが必要なため熱活性的な運動になることが知られている。しかし, その効果は時間スケールに繰り込まれ, 長時間の振舞いは k^2t scaling になることもわかっている。この場合, ドメイン壁の成長は $L(t) \propto \sqrt{\exp\left(\frac{-\Delta}{k_B T}\right)t}$ で与えられる[3]。

また, 不均一系ではドメイン壁のpinningによるゆっくりした緩和 ($L \propto (\log t)^4$ など) が希釈

系, ランダム強磁性, ランダムスピンなどの系で議論されてきた[4]。実際のランダムスピン系で $L \propto (\log t)^4$ が現れるか, 熱活性的な移動度をもつ k^2t scaling が現れるかは系の性質によると考えられている[5]。

ドメイン壁の運動と量子効果に関しては, 一次元磁性体 (反強磁性体, 横磁場のかかった強磁性体) において局在配位の量子拡散が議論されている。その場合, ドメイン壁の形は量子的な分布で平均されて, シニソイダルになってしまう[6,7]。また, 拡散速度がスピンの大きさとともに遅くなり, 古典的な場合のソリトンに自然に移行していくことも調べられている[8]。また, ドメイン壁がピンギングされている時などはその運動は量子トンネル現象としても取り扱われている[9]。この量子トンネル確率が系に散逸がある場合, 減少することも理論され, 量子摩擦などとよばれることがある。この量子トンネル確率の現象は, デビニングの現象につながり, ドメイン壁の運動の摩擦の原因となると考えられるが, 直接的な関係は今後の問題である。また, ドメイン壁の運動を外場の掃引による非断熱遷移と捉え, その運動を研究するのも興味深い問題である。

- [1] Y. Oono and S. Puri: Phys. Rev. A38 (1988) 434.
- [2] I. M. Lifshitz, Zh. Eksp. Teor. Fiz. 42 (1962) 1354. [Sov. Phys. JETP 15 (1962) 939],
S. M. Allen and J. W. Cahn, Acta Metall 27 (1979) 1085.
- [3] H. Takano and S. Miyashita : Phys. Rev. B48 (1993) 7221.
- [4] D. Huse and C. L. Henley : Phys. Rev. Lett. 54 (1985) 2708.
- [5] T. Kawasaki and S. Miyashita: Prog. Theor. Phys. 89 (1993) 985.
- [6] J. Villain : Physica B79 (1975) 1.
- [7] H. -J. Mikeska, S. Miyashita and G. Ristow : J. Phys. Cond. Matter 3 (1991) 2985.
- [8] H. -J. Mikeska and S. Miyashita : Z. Phys. B101 (1996) 275.
- [9] A. O. Caldeira and A. J. Leggett: Phys. Rev. Lett. 46(1981) 211 and Ann. Phys. 149 (1983) 374.

メゾスコピック強磁性体における自由磁壁の量子力学

東北大学大学院理学研究科物理学 柴田 絢也

近年の実験技術の発展に伴い、準一次元メゾスコピック強磁性細線の作成が可能になり、興味ある巨視的量子現象が理論的、実験的に研究されている。理論的考察の例を挙げると、Macroscopic Quantum Tunneling(MQT)における磁壁中心の depinning, 磁壁の chirality の Macroscopic Quantum Coherence (MQC) などである。

これらの現象は、系の量子力学的振る舞いに特徴的な集団自由度（今の場合、磁壁中心と chirality）を用いた描像において考察することが最も直感的である。しかしながら、磁壁は多数のスピンから構成される多自由度系であり、少数の集団自由度のみで系を記述する為には、微視的な基礎付けが必要である。微視的な基礎付けとは、元々のスピン自由度を集団自由度とそれ以外の環境自由度に仕分け、集団自由度のみで記述される部分が量子力学的粒子と同等に振る舞うことを保証し、また、内在的に含まれる環境自由度との影響を考察することである。従来の研究において、このような試みは行われているけれども、論理的に不明瞭な点が散見し、到底満足できるものではない[1]。

本研究では、ピン止め、外磁場の影響を無視した自由磁壁の状況を先ず最初に考え、系の集団自由度による記述の微視的基礎付けを行い、今後磁壁のMQT, MQCを考察していく準備をする。

モデルとして、 $\hat{H} = -\vec{J} \sum_{\langle i,j \rangle}^{N_L} \hat{S}_i \cdot \hat{S}_j - \frac{1}{2} \sum_j^{N_L} (K \hat{S}_{j,z}^2 - K_{\perp} \hat{S}_{j,x}^2)$ を考え、系の遷移振幅を評価する。始、終状態には spin-coherent-state を採用し、遷移振幅の評価には spin-coherent-state path integral(scspi) を用いる。経路積分にあらわれる作用から、系の configuration を決める static 解を求め、系の対称性に着目し、並進不変性から磁壁中心、回転不変性から chirality をそれぞれ集団自由度として採用する。その際、対称性に付随するゼロモードを、Faddeev-Popov の方法を多自由度系における scspi 形式において用いることにより、環境自由度から取り除く。この一連の考察は経路積分形式における変数変換に他ならない。

変数変換後の作用は、集団自由度のみを含むものと環境自由度のみを含むものは、それぞれ、boson-coherent-state-path-integral 形式で書くことができる。集団自由度と環境自由度との相互作用は、今回考察を行っていないが、双一次線形相互作用型にはなっておらず、非線型な相互作用であり複雑である。

集団自由度のみを含む作用から、停留作用近似を用いることにより磁壁の量子力学的振る舞いを考察する。停留作用と停留作用経路の周りの揺らぎの寄与から、遷移振幅を求め、その遷移確率を評価する。磁壁の遷移確率の具体的な形と量子力学的自由粒子の正確に求められる遷移確率とを比較することにより、磁壁において波束の概念を導入することができ、磁壁中心はその波束の中心座標、chirality はその運動量とに対応付けられる。したがって、磁壁は量子力学的自由粒子のよう

に振る舞うことが分かる。しかし、系にはピン止め、外磁場の影響が無いとはいえ、多くのスピンからなる多自由度系であり、直ぐには自由粒子的に振舞うとは言えない。これは、集団自由度の描像に立脚する、即ち、上手い変数を取ることによって初めていえることであり、多自由度系を扱う一つの手段である。また、磁壁は完全に自由粒子に対応するとはいえず、ある chirality の場合には、スピンによる非線型性から、自由粒子とは異なった振る舞いをする。詳しくは、文献 [1] を参照されたい。

[1] J. Shibata and S. Takagi, cond - mat/9910060, submitted to Phys. Rev. B.

量子力学的な磁壁と電気抵抗

東京理科大学理学部 山中 雅 則

近年、強磁性金属細線における電気伝導の研究が精力的に行なわれている。その動機の1つに伝導電子のスピン自由度と量子輸送現象との関連が挙げられる。これは、従来の半導体等の輸送問題においては積極的には考慮されてこなかった自由度である。輸送問題を完全に量子力学的な多体効果を取り入れた形での定式化を行なうためには、スピン自由度（いわゆるスピン揺らぎ）の正確な取り扱いが不可欠である。このような考察は、これまでに正確には議論されていない。

最も典型的な状況として、量子磁壁が存在する場合の輸送問題を挙げる事ができる。しかし、これを正確に取り扱う試みは、直ちに困難に直面する。量子磁壁の基底状態、励起状態がいずれも量子力学的な多体問題を解くことによって初めて得られるものであるからである。

近年、量子磁壁の厳密解を調べる試みが行なわれている。Alcaraz ら [Alcaraz et. al., PRL 75, p930 (1993)] は 1 次元量子強磁性ハイゼンベルグ模型のベータ仮設解を得た。Koma ら [Koma et. al., Lett. Math. Phys. 40, p1 (1997): Adv. Theor. Math. Phys., 2 (1998)] は、ベータ仮設によらない厳密解を得、それがベータ仮設解に一致することを示した。さらに 2 次元系の厳密解を構成した。Matsui [Lett. Math. Phys. 37 p397 (1996): 42 p229] は 3 次元以上の任意の次元へ拡張した。これらの一連の研究により、1 次元磁壁と 2 次元以上の磁壁では、基底状態の性質が決定的に異なる。また、並進対称性の破れに関係した gapless mode が存在するという事などが解明された。特に、熱力学的極限における基底状態の完全系が得られたことは注目に値する。

我々は、これらの厳密解を用い、(2 次元以上の系に関して) 伝導電子に対する実効的なシュレーディンガー方程式を導出した。この方程式は以下の性質をもつ

- (1) 伝導電子と磁壁のスピン相互作用が実効的なポテンシャルとして取り入れられている。
- (2) この相互作用は、伝導電子と磁壁との衝突による磁壁の励起を実効的に含む。

(3) 1次元極限, または, 伝導電子のゼロエネルギー極限では我々が既に得ているもの[Yamana-ka et. al. J. Mag. Soc. Jpn., 23 p141 (1999)]に連続的に帰着する。

これらの結果は, Cabreraらが古典的な現象論から導出したもの[Cabrera et. al. Status Solidi(b), 61 p539(1968)]に一致する。つまり, 現象論的に良く知られた方程式をミクロな模型から実際に導出したことになっている。仮に, 伝導電子が磁壁の低エネルギーモードを励起させない場合は, 磁壁は古典的なものと考えて良いので, これらは互いにコンシステントである。

この方程式は, 今のところ厳密に解くことはできないと考えられているため, 数値計算の手法により, 透過率等を求めた。また, フェルミの黄金律を用いることにより, 磁壁の低エネルギーモードを考慮した場合の透過率を求めた。

Tataraら[Tatara et. al., PRL 78 p3773 (1997)]により不純物による伝導電子の量子干渉効果(コヒーレンス, デコヒーレンス)が議論されているが, 本研究は全く異なった立場と問題意識からのアプローチであるといえる。

これらは, すべて高麗徹氏(学習院大学理学部)との共同研究によるものである。

ジョセフソン接合における量子効果と摩擦

東大物性研 加藤 岳生

超伝導を利用した素子であるジョセフソン接合は, 超伝導のマクロなコヒーレンスが顕著に反映された素子であり, 古くから研究が行われている。一方ジョセフソン接合を小さくしていくと, 帯電の効果が無視できなくなり, 電流が流れなくなる現象(クーロンブロッケイド現象)が現れる。この現象は, 接合の特性を支配する超伝導の位相差の量子揺らぎとして記述されるが, 一般に接合には散逸を伴うので, この散逸の効果も取り入れた計算が必要である。つまりジョセフソン接合は, 散逸を含む量子力学によって記述される典型的な系であるといえる。

単一のジョセフソン接合について, ここ十数年に渡り理論的な考察が行われているが, 系の熱力学やI-V特性についての詳しい評価は, 一部の可解となるパラメータ領域を除き, 行われていなかった。そこで散逸が弱い場合について, 解析的な計算を行い, 新しい特徴を見出したことを報告した。まずジョセフソン接合系を摩擦のある周期的ポテンシャル中の一粒子の問題にマップし, そこでのトンネルの有効行列要素を Δ とする。系の特徴的な温度のスケールは Δ によって決まっているが, 一方で系の状態密度は, 無次元化した摩擦の強さ K に対して, $K\Delta$ のエネルギースケールで大きな変更を受け, マクロな縮退を生じていることがわかった。この極めて著しい状態変化を反映して, 系のI-V特性にも $K\Delta$ のエネルギースケールに特徴があらわれることを示した。

また, 接合部分を長くしたジョセフソン接合では, 位相差の空間的な変化が重要となり, 位相差

に対する多体量子現象が期待される。長いジョセフソン接合系は、サインゴルドン方程式で記述され、フラクソンと呼ばれる数十マイクロメートル程度のマクロな大きさのソリトンが存在する。このマクロなソリトンに対する量子トンネル効果の評価についても、報告を行った。この量子トンネル効果は、現在の微細加工技術の範囲内で十分な低温(数十ミリケルビン程度)で観測できることを示した。また、二つの安定状態の間を量子的にトンネルして起こる存在確率の時間的振動(巨視的量子コヒーレンス現象)の観測の可能性についても理論的考察を行い、モデルの範囲内で、観測可能であるとの結論を示した。

これらの単一ジョセフソン接合や長いジョセフソン接合素子における摩擦を含む量子効果の実験的検証は始まったばかりであり、実験家との議論を通してさらなる興味深い現象を追求していきたいと考えている。

- [1] Takeo Kato and Masatoshi Imada: to be published on J. Phys. Soc. Jpn, Vol. 69 (2000) No.1
- [2] Takeo Kato and Masatoshi Imada: J. Phys. Soc. Jpn, Vol. 65 (1996) p.2963

物性研究所談話会

日 時 2000年3月7日(火) 午前11時~12時
場 所 物性研究所 Q棟1階講義室
講 師 Andreas Klümper 教授
(所属) (Dortmund University)
題 目 Pressure Dependence and Non - universal Effects of Microscopic Couplings on the Spin - Peierls Transition in CuGeO_3

要 旨

The theory by Cross and Fisher (CF) is now commonly accepted for the description of the spin - Peierls transition within an adiabatic approach, involving a continuum approximation for the relevant response function. Using density matrix renormalization group (DMRG) techniques we are able to treat the spin system exactly up to numerical inaccuracies. Thus we find the correct dependence of the equation of state on the spin - spin interaction constant which drops out completely in the CF theory. With respect to CuGeO_3 we focus on the pressure dependence of the critical temperature and analyze the ratio of the spectral gap and the transition temperature.

日 時 2000年3月7日(火) 午後3時~
場 所 物性研究所 Q棟1階講義室
講 師 Lian Li 助教授
(所属) (Department of Physics and Laboratory for Surface Study, University of Wisconsin, Milwaukee, USA)
題 目 Organometallic Surface Chemistry of III/V Compound Semiconductors
要 旨

Many electronic devices are synthesized through the heterogeneous decomposition of organometallic molecules on semiconductor surfaces. We have investigated the surface reactions of arsine, phosphine, hydrogen, carbon tetrachloride, and several other molecules on III/V compound semiconductors, using scanning tunneling microscopy, reflectance difference spectroscopy, internal reflectance infrared spectroscopy and ab initio clusters calculations with density functional theory. We have discovered that the composition and structure of the surface plays a crucial role in mediating the decomposition pathways of the ad-

sorbed molecules. An overview of the organometallic surface chemistry of this important class of materials will be presented.

日 時 2000年3月10日(金) 午後4時~5時

場 所 物性研究所 Q棟1階講義室

講 師 Holger Frahm 助教授

(所属) (Institute of Theoretical Physics, University of Hannover)

題 目 Doped Quantum Spin Chains: Phase Diagram of an Integrable Model

要 旨

A family of exactly solvable models describing a spin S Heisenberg chain doped with mobile spin - $\left(S - \frac{1}{2}\right)$ carriers is studied by means of the thermodynamic Bethe Ansatz. The models generalize the supersymmetric t - J model which is obtained for $S = \frac{1}{2}$. In absence of a magnetic field the models show a new type of spin - charge separation: in the spin sector of the theory one has two types of massless excitations, which can be identified as the spinons in a level - $2S$ $SU(2)$ WZW model and the critical mode of the minimal unitary model M_{2s+1} , respectively. In a magnetic field a spin gap phase leading to doping - induced plateaus in the magnetization curve is found.

人 事 異 動

研究部門等

(採用)

所 属	職・氏名	発令日	備 考
物性理論研究部門	助 手 城 石 正 弘	12. 2. 16	新規採用

所 属	職・氏名	発令日	備 考
附属物質設計評価施設	助 手 村 岡 祐 治	12. 3. 1	新規採用

(転任)

所 属	職・氏名	発令日	備 考
新物質科学研究部門	教 授 榊 原 俊 郎	12. 3. 1	北海道大学大学院理学研究科教授から

Technical Report of ISSP 新刊リスト

Ser. A

- No. 3520 X-Ray Diffraction from an Atomic Plane, by Wataru Yashiro and Toshio Takahashi.
- No. 3521 High Pressure and High Temperature Behavior of $LiNbO_3$ up to 90 GPa, by Taihei Mukaide, Takehiko Yagi, Nobuyoshi Miyajima, Tadashi Kondo, Nagayoshi Sata and Takumi Kikegawa.
- No. 3522 Effective Hamiltonian for Charge-Ordered Yb_4As_3 , by Hiroyuki Shiba, Kazuo Ueda and Osamu Sakai.
- No. 3523 Theoretical and Experimental Study of Resonant 3d X-Ray Photoemission and Resonant $L_3M_{45}M_{45}$ Auger Transition of PdO , by Takayuki Uozumi, Tetsuo Okane, Kenji Yoshii, Teikichi A. Sasaki and Akio Kotani.
- No. 3524 Charge Ordering in Organic ET Compounds, by Hitoshi Seo.
- No. 3525 Chiral-Glass Transition and Replica Symmetry Breaking of a Three-Dimensional Heisenberg Spin Glass, by Koji Hukushima and Hikaru Kawamura.
- No. 3526 Neutron Diffraction Study of the Magnetic Ordering of $CeCuAl_3$, by Yasuaki Oohara, Gaku Motoyama, Takashi Nishioka and Masaaki Kontani.
- No. 3527 Spin-1 Chain Doped with Mobile $S = 1/2$ Fermions, by Beat Ammon and Masatoshi Imada.
- No. 3528 Electrophoresis of a Polyelectrolyte in a Space with Immobile Obstacles, by Ryuzo Azuma and Hajime Takayama.
- No. 3529 Pressure-Induced Phase Transition in NaV_2O_5 at Low Temperature, by Kenji Ohwada, Hironori Nakao, Hirondo Nakatogawa, Naohisa Takesue, Yasuhiko Fujii, Masahiko Isobe, Yutaka Ueda, Yusuke Wakabayashi and Youichi Murakami.
- No. 3530 Polarization Dependence in Resonant X-Ray Emission of TiO_2 , by Akio Kotani.

- No. 3531 Magnetic and Quadrupolar Order in Rare-Earth Palladium Bronzes RPd_3S_4 , by Kazuo Abe, Jiro Kitagawa, Eiichi Matsuoka, Naoya Takeda and Masayasu Ishikawa
- No. 3532 Neutron Scattering Study of Magnetic Ordering in $CuFe_{0.95}Al_{0.05}O_2$, by Yasuaki Oohara, Mamoru Mekata, Tsuyoshi Morishita, Kazuhiko Kakurai, Masakazu Nishi, Tong-Rong Zao and Humihiko Takei

物性研だより第39巻目次（第1号～第6号）

第39巻第1号 1999年5月

所長に就任して	福山秀敏	1
物性研の思い出あれこれ	古川信夫	6
物性研究所の現状		8
物性研ニュース		
○ 人事異動		43
○ 平成11年度 物性研究所協議会委員名簿		49
○ 平成11年度 共同利用施設専門委員会委員名簿		50
○ 平成11年度 外来研究員等委員会委員名簿		51
○ 平成11年度 人事選考協議会委員名簿		51
○ 平成11年度 高輝度光源計画推進委員会委員名簿		52
○ 平成11年度 軌道放射物性研究施設運営委員会委員名簿		53
○ 平成11年度 中性子散乱研究施設運営委員会委員名簿		54
○ 平成11年度 中性子散乱実験審査委員会委員名簿		55
○ 平成11年度 物質設計評価施設運営委員会委員名簿		56
○ 平成11年度 スーパーコンピュータ共同利用委員会委員名簿		57
○ 平成11年度 スーパーコンピュータ共同利用課題審査委員会委員名簿		58
○ 平成11年度 物質合成・評価設備共同利用委員会委員名簿		59
○ 平成11年度 前期短期研究会一覧		60
○ 平成11年度 前期外来研究員一覧		61
○ 平成11年度 中性子回折装置共同利用採択課題一覧		79
○ 平成11年度 前期スーパーコンピュータ共同利用採択課題一覧		92
○ 平成11年度 後期共同利用の公募について		97
○ 物性研究所物性科学入門講座		125
○ 東京大学物性研究所における大学院修士及び博士課程進学ガイダンスの お知らせ		126
○ 平成10年度外部資金の受入れ状況について		127
○ テクニカル・レポート 新刊リスト		128
第44回物性若手夏の学校		130
編集後記		

第39巻第2号 1999年7月

「物性研を離れて」	高 増 正	1
「物性研に着任して」	木 下 豊 彦	3
「研究室だより」	上 田 和 夫	5
物性研究所短期研究会報告		
○ 「強相関電子系としての分子性伝導体」		10
世話人 田島裕之, 齋藤軍治, 小林速男, 薬師久彌, 鹿野田一司, 三谷洋興, 永長直人		
物性研究所談話会		76
物性研ニュース		
○ 安岡前所長英国アン女王より名誉賞受賞		79
○ 人事異動		82
○ テクニカル・レポート 新刊リスト		83
編集後記		

第39巻第3号 1999年9月

物性研究所の14年間とその後	田 中 虔 一	1
物性研に着任して	長谷川 幸 雄	9
物性研究所短期研究会報告		
○ 「物性研究における計算物理—新しいアルゴリズムと超大型計算」		12
世話人 高山 一, 押山 淳, 前川禎通, 岡部 豊, 樋渡保秋, 今田正俊, 常行真司, 藤堂眞治, 福島孝治		
物性研究所談話会		70
物性研ニュース		
○ 東京大学物性研究所 客員分野教授・助教授公募		74
○ 東京大学物性研究所 助手公募		76
○ 東京大学物性研究所 助教授又は教授公募		78
○ 東京大学物性研究所 助手公募		80
○ 人事異動		82
○ 2000年度日米科学協力事業「中性子散乱」研究計画の公募		84
○ テクニカル・レポート 新刊リスト		85
編集後記		

第39巻第4号 1999年11月

「物性研を離れて」	松下裕秀	1
「研究室だより」	八木健彦	4
物性研究所短期研究会報告		
○ 「極限環境物性の現状と将来展望」		8
世話人 三浦 登, 毛利信男, 後藤恒昭, 石本英彦, 長田俊人		
物性研究所談話会		86
物性研ニュース		
○ 人事異動		90
○ 平成11年度 後期短期研究会一覧		92
○ 平成11年度 後期外来研究員一覧		93
○ 平成11年度 後期スーパーコンピュータ共同利用採択課題一覧		111
○ 平成12年度 前期共同利用の公募について		112
○ 平成11年度外部資金の受入れ状況について		140
○ テクニカル・レポート 新刊リスト		141
編集後記		

第39巻第5号 2000年1月

私の物性研第2期	白濱圭也	1
物性研究所研究会シリーズ「物性研究の展望」報告		
○ 「先端分光物性研究の現状と将来展望」		3
物性研究所短期研究会報告		
○ 「低次元磁性体の磁化過程に見られる新しい量子現象」		91
世話人 坂井 徹, 上田和夫, 後藤恒昭, 高橋 實, 押川正毅, 網代芳民, 野尻浩之, 太田 仁, 勝又紘一		
物性研究所談話会		175
物性研ニュース		
○ 人事異動		179
○ テクニカル・レポート 新刊リスト		180
編集後記		

第39巻第6号 2000年3月

物性研を離れて一年経って	白石潤一	1
物性研究所研究会シリーズ「物性研究の展望」報告		
○「表面・人工物質における物性科学のフロンティア」		4
物性研究所短期研究会報告		
○「多自由度系の運動と摩擦の物理」		60
世話人 松川 宏, 三本木 孝, 川端和重, 高山 一, 河野公俊, 鈴木敬愛, 塚田 捷, 宮下精二, 前田京剛, 鈴木 勝, 石渡信一, 白濱圭也		
物性研究所談話会		147
物性研ニュース		
○ 人事異動		149
○ テクニカル・レポート 新刊リスト		150
○ 物性研だより 第39巻目録(第1号~第6号)		152
編集後記		

編 集 後 記

今回の物性研だよりの原稿は、昨年物性理論研究部門の助手から駒場の大学院数理科学研究科に転出された白石さんをお願いいたしました。

この物性研だよりは六本木キャンパスからの最後の便りになると思います。編集後記を書いている間も、あちこちの研究室の引っ越しの準備で廊下がごった返しております。

なお、次号の原稿締切りは4月10日です。

所属又は住所変更の場合等は事務部共同利用掛までご連絡願います。

松 田 祐 司

今 田 正 俊

