U.D.C. 〔537.311.1.098:537.611.2:538.945〕:〔621.315.57:546.666′56′431-31〕

高温超電導体の磁束量子のダイナミックス

Dynamics of Fluxons in High Temperature Superconductor

小野木敏之* Toshiyuki Onogi
市口恒雄** Tsuneo Ichiguchi
番　雅司** Masashi Ban
村山良昌*** Yoshimasa Murayama

磁場中の超電導状態では，試料内部に侵入した磁束量子の運動に伴いエネルギーが散逸していくことが知られている。銅酸化物系の新超電導物質で，この運動のメカニズムを解明することは，新材料の応用面での可能性を探索するうえで重要であるにもかかわらず，その理解は乏しい。日立製作所では，YBCO系の酸化物超電導体の散逸現象を電気伝導機構の観点から探ることを目的とし，良質の$ErBa_2Cu_3O_{7-x}$薄膜について，磁場中でのV-I特性と磁気抵抗を，まず液体窒素温度(77 K)で測定した。その結果，この二つの特性が互いに類似なべき乗則に従う特徴的な非線形伝導現象を発見した。この特異な非線形散逸現象は，銅酸化物系に固有な層状構造の持つ2次元的ゆらぎ(低次元性)と大きな熱的ゆらぎによって励起した磁束量子・反磁束量子の対によって起こることを示唆する。さらに，べき乗則の指数の温度依存性をもとに，この系で磁束量子対が熱的に解離することにより，酸化物超電導物質の2次元構造を反映した特有の相転移が起こることを示す。

1 緒　言

これまで発見されてきたLa系，Y系，Bi/Tl系などの酸化物高温超電導体は，いずれも典型的な第Ⅱ種超電導体である[1]。一般に第Ⅱ種超電導体に磁場をかけると，常電導から超電導への転移が起こる温度，すなわち臨界温度T_c以下の温度で，いわゆる混合状態(あるい渦糸状態)と呼ばれるマイスナー効果が不完全な相が存在することが知られている[2]。この相では，磁束はフィラメント状に試料に侵入する。このとき磁束は，$\Phi_0=hc/2e$($2e$：クーパー対の電荷)を単位として量子化されているが，この磁束量子の静的，動的なふるまいは，材料としての特性を決定づけるほど重要な役割を果たす。磁束量子が，個々にあるいは集合としてどのような状態をとるのか，実験的，理論的に解明していくことは，基礎的物性の見地からだけでなく，超電導マグネットやデバイスなどの応用面からも重要な課題である。

酸化物新超電導体は，従来のNb・Ti合金などの金属系超電導体と異なる注目すべき基本的な特徴をいくつか持っている。それらには，(1)低次元性(層状構造)，(2)大きい熱的ゆらぎ，(3)短いコヒーレンス長，が挙げられる。最近，これらの特徴に関連して，混合状態の静的・動的性質のなかに，磁束の巨大クリープ(Giant Flux Creep)，磁束格子の融解(Flux Lattice Melting)，磁束の絡み合い(Flux Entanglement)，超電導グラス(Superconducting Glass)などの磁場中での異常なふるまいが報告され[3]，酸化物超電導体が固有に持つゆらぎの効果の重要性が指摘されている。

日立製作所では，約90 Kの高い臨界温度を持つY系酸化物超電導体の磁場中での伝導特性を測定することによって，磁束量子の運動が原因で現れると考えられるマクロな散逸の性質，すなわち抵抗状態の性質を調べた。測定では，良質の薄膜単結晶$ErBa_2Cu_3O_{7-x}$を用い，磁場H中で輸送電流Iを流したとき試料に誘起される電圧Vを，IおよびHの関数として液体窒素温度(77 K)で求めた。その結果，V-I特性と磁気抵抗(V-H特性)が互いに類似なべき乗則で表されること，それぞれの指数(共に，1より大きい)が，外部磁場の大きさあるいは流す電流値に強く依存することなどを見いだしてきた[4]。この結果は，従来の金属系バルク試料で観測されてきた線形則や指数則とは明らかに異なるものである[5]。この特徴的なべき乗則には，層状構造(CuO_2面)が持つ「2次元的なゆらぎ」および「大きな熱的ゆらぎ」が本質的であり，これらが原因となって超電導相に励起された磁束量子対がべき乗則をもたらしている可能性が大きい。最近，日立製作所により，指数の温度依存性の精密測定が行われ，T_c以下の温度で2次元系に特有のトポロジカルな相転移であるKT(コスタリツ・サウレス)転移が

* 日立製作所基礎研究所 理学博士　** 日立製作所中央研究所 理学博士　*** 日立製作所基礎研究所

磁場中で明確に見いだされている。これは束縛された磁束量子対が，KT転移の転移温度(T_{KT})以上で熱的に解離することによる相転移として解釈できる。

本稿では，まずサンプルの概要と測定法，測定結果について述べ，次に，日立製作所で見いだしたV-I特性と磁気抵抗のべき乗則とが共存するような磁場中非線形伝導現象を，磁束量子対の解離のメカニズムの観点から議論する。

2 V-I特性と磁気抵抗(V-H特性)のべき乗則

測定に用いたサンプルは，rf マグネトロン・スパッタ法により基板MgO上にエピタキシアル成長させた厚さ0.7 μmの$ErBa_2Cu_3O_{7-x}$薄膜である。その微小構造として，(1) c軸は基板の表面に対して垂直の方向にあり，高い配向性を持つこと，(2) (110)面に多くの双晶境界(そこを境としてa軸とb軸が入れ替わる)が存在するが，ab面は平たんであることなどがわかっている[6]。

標準的な4端子法を用いて，この薄膜に生じる電圧Vを測定した。ここで，輸送電流Iの方向はab面に，磁場Hの方向はc軸に並行である。また電流経路の断面の大きさは，S=幅0.1 mm×厚さ0.7 μmである。ゼロ磁場で常電導状態から超電導状態に転移する温度は87 K(転移幅=2−3 K)であるが，この実験では，サンプルは直接液体窒素中にセットしたため，測定中のサンプルの温度は常に転移温度以下の77 Kに保たれているとしてよい。

V-I特性(H=0.1 T，0.2 T，0.4 T，0.5 T，0.6 T，0.8 T，1.0 T)を**図1**(a)に，磁気抵抗(I=20 mA，40 mA，60 mA，80 mA，100 mA，120 mA)の測定結果を**図2**(a)に$\log V$-$\log I$プロット，$\log V$-$\log(H-H_0)$プロットとして示す。重要なことは，電流と磁場の幅広い範囲で，おのおのの非線形性が次の類似なべき乗タイプの関数形でよく表せることである。

$$V \propto I^{n(H)}, \quad \cdots\cdots(1)$$

$$V \propto (H-H_0)^{m(I)}, \quad H_0=0.07\ \mathrm{T} \cdots\cdots(2)$$

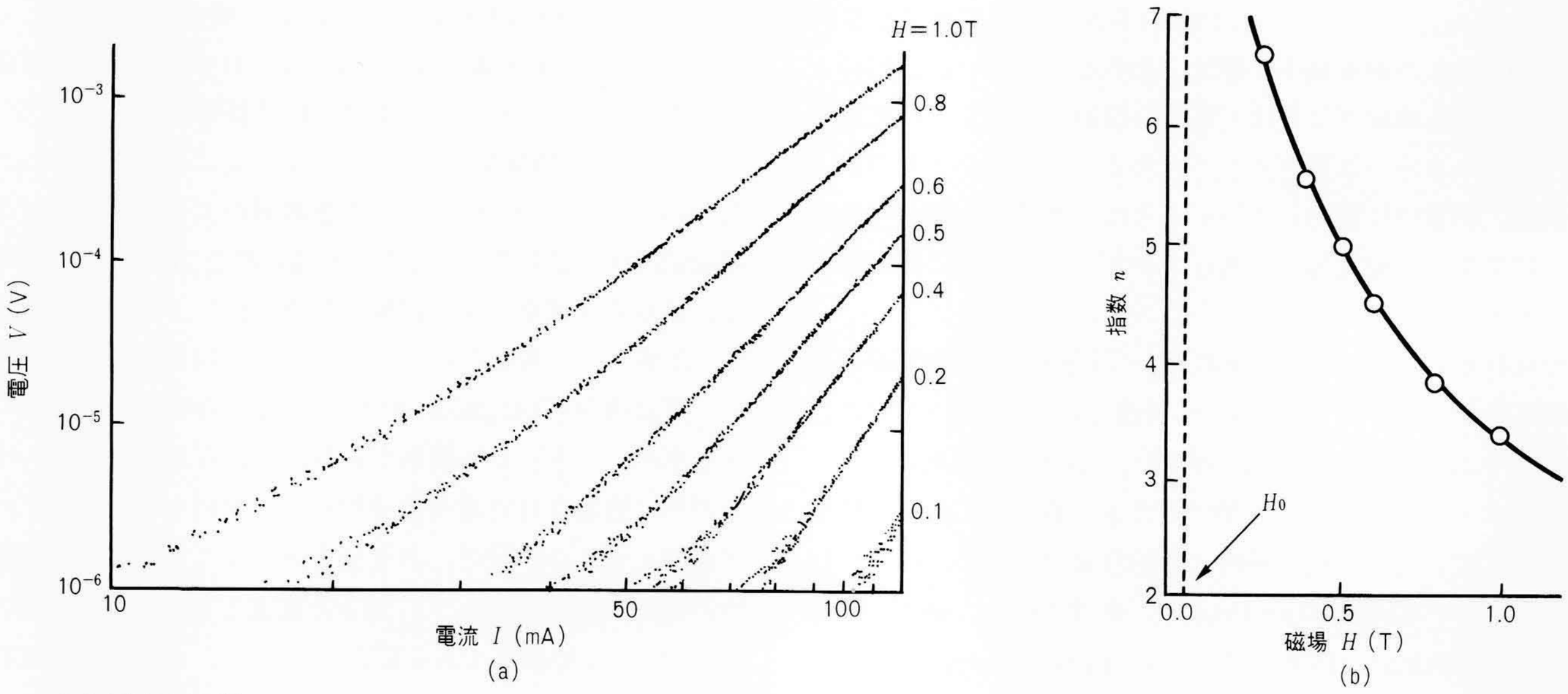
ここで，nは磁場Hにだけ依存する指数，mは電流Iにだけ依存する指数である。上記の関数形を仮定して求めた各指数n，mを**図1**(b)，**図2**(b)に示す。H_0は，電流によらないと仮定したパラメータであり，その値は測定データの(2)式に対するベスト フィットによって求めた。**図1**，**2**から，各指数の磁場または電流依存性は互いに類似であり，測定範囲内で3から7までの大きな値をとること，さらに，それぞれが低磁場側($H \to H_0$)および低電流側($I \to 0$)で発散する傾向を持っていることがわかる。

(1)式と(2)式が同時に成り立つとすると，次の関係式が許される。

$$\log(V/V_a) \propto \log(I/I_a) \times \log\{(H-H_0)/H_a\}, \cdots(3)$$

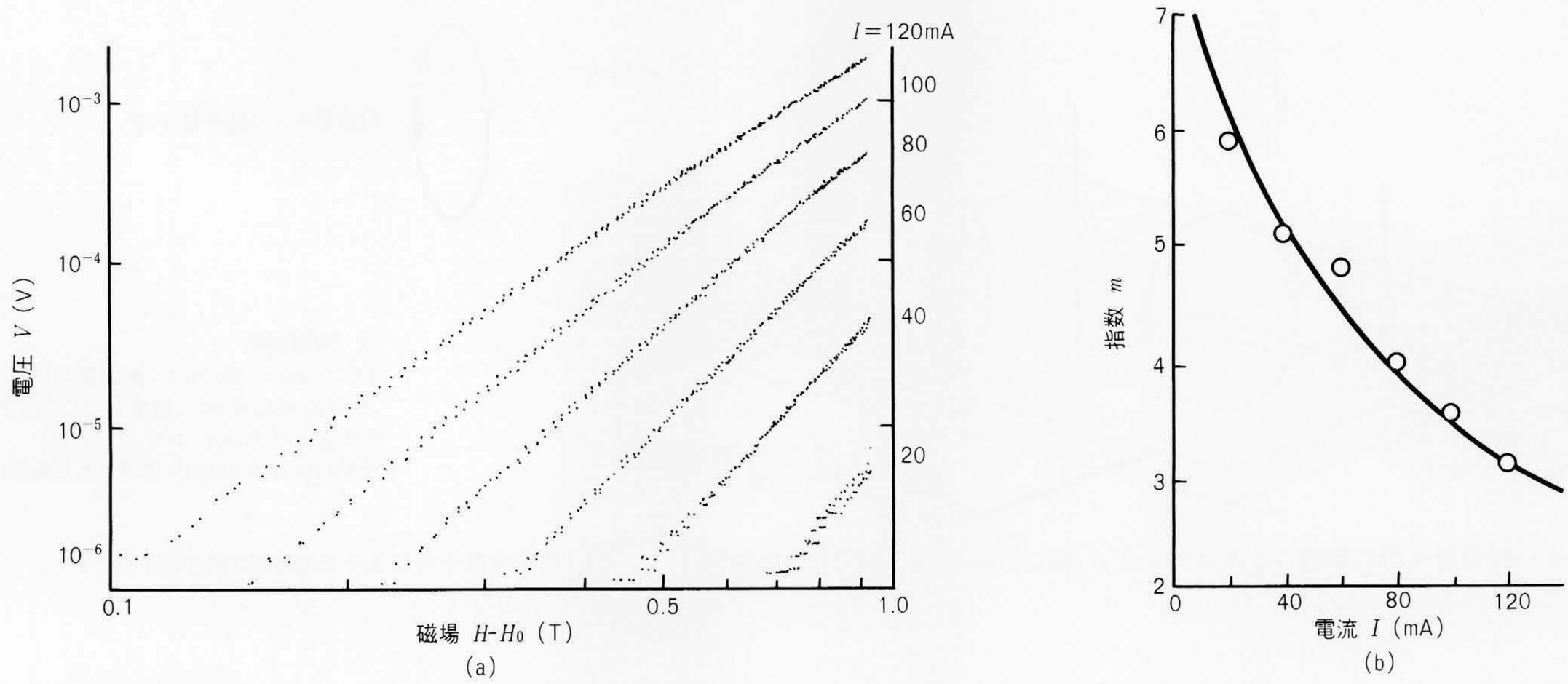
この実験則はデータに矛盾しない。こうして，Y系酸化物超電導体薄膜の混合状態(温度77 K)は，比較的大きい外部磁場と輸送電流の領域まで，V-I特性と磁場抵抗のべき乗則の共存で特徴づけられるような非常に特徴的な非線形散逸(抵抗)状態にあることが結論される。

H_0はゼロでない電圧が生じる磁場の臨界値であるが，この値は下部臨界磁場H_{C1}に対応すると考えられる。これは，単純には外部磁場がH_{C1}を超えると，磁束がバルクに侵入し始め，したがって，磁束量子の運動が可能になるはずであるからで



注：出典(参考文献4))

図1 V-I特性の測定結果と指数 (a) V-I特性(温度77 K)と，(b) 指数nの磁場依存性を示す。磁場Hの値は，H=0.1 T，0.2 T，0.4 T，0.5 T，0.8 T，1.0 Tである。



注：出典（参考文献4））

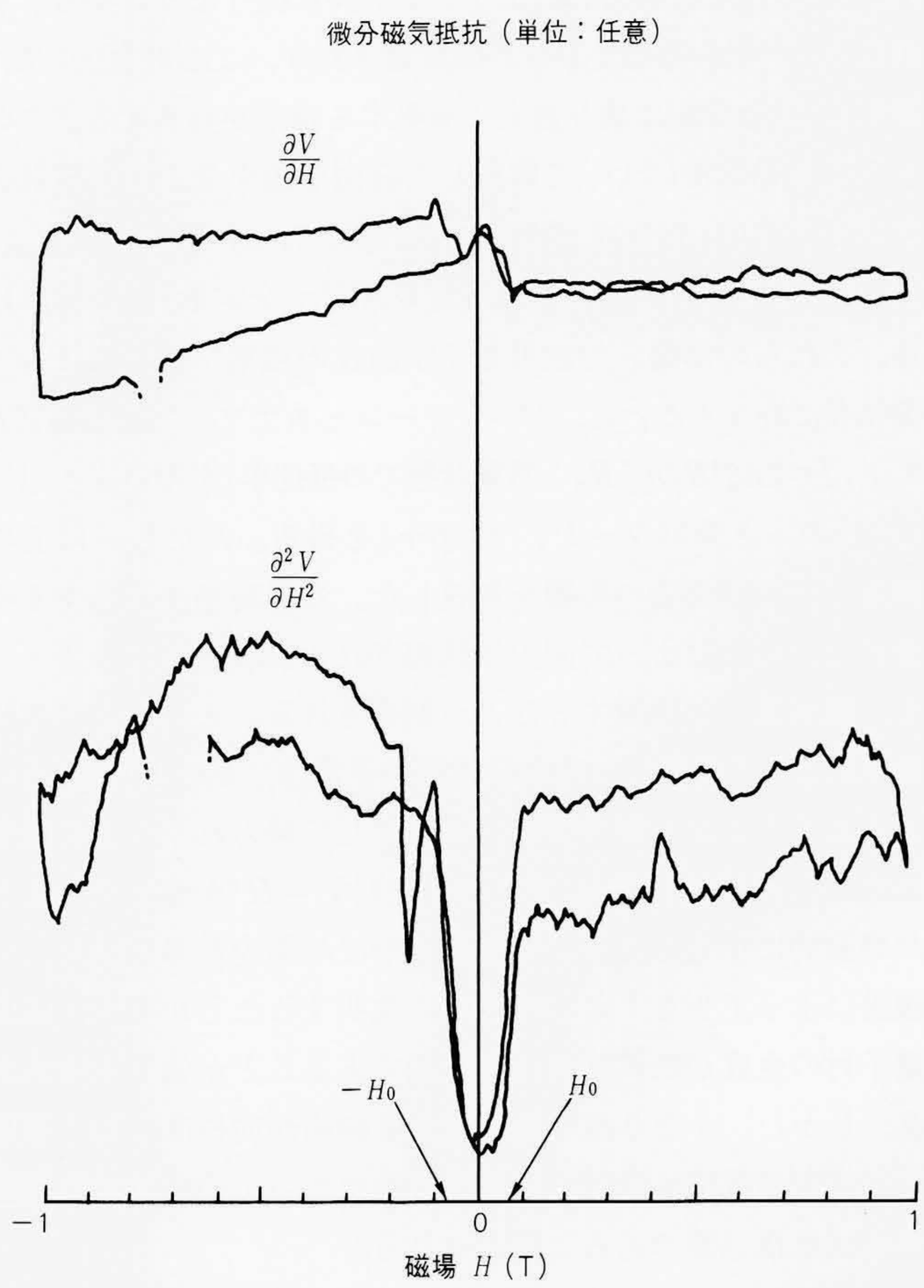
図2　磁気抵抗の測定結果と指数　(a) 磁気抵抗（温度77 K）と，(b) 指数mの電流依存性を示す。電流Iの値は，I＝20 mA，40 mA，60 mA，80 mA，100 mA，120 mAである。

ある。サンプルの幾何学的形状（薄膜）を考慮すると，H_{C1}以下でも磁束量子はサンプルに侵入するが，下部臨界磁場は，なおも特異点としての性格を残していると考えられる。こうして，H_{C1}は，H_0＝0.07 Tに近い値をとると思われる。この値は，最近，単結晶Y-Ba-Cu-Oの磁化測定の解析から求められた値，H_{C1}＝0.069(5) T（温度：11 K）と比較すべきである[7]。さらに，このdc測定で得られた誘起電圧の弱磁場側の臨界的挙動を，より感度よく検出するため，交流法を利用して電圧の磁場微分を磁場Hの関数として測定した。**図3**に示したように，低磁場H_0（＝0.07 T）近傍で，電圧の2階微分$\partial^2 V/\partial B^2$に跳びのように見える鋭い変化が現れる。これは，上記のdc法による測定のデータ解析で示唆した結果，すなわちH_0が臨界点であることとつじつまが合っている。

3　磁束量子対の解離のメカニズムとKT転移

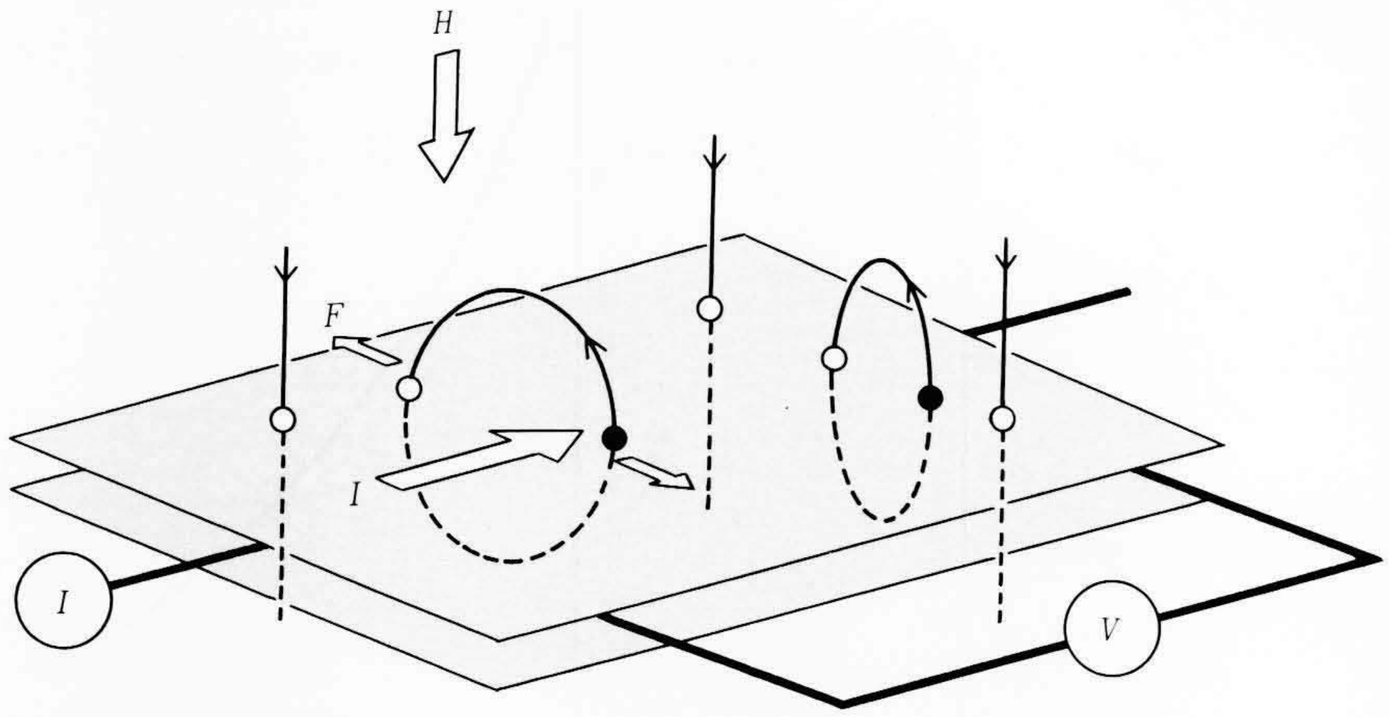
磁束フロー理論によると，輸送電流が存在するとき，磁束量子はローレンツ力$\Phi_0 \times I/c$を受けて電流と垂直方向に定常的な粘性運動を行う。このとき，ジョセフソン効果と同じ原理で電流方向に電圧が誘導され，系に抵抗状態が生じる[2),5)]。酸化物超電導体では，その2次元（2D）伝導性に着目すると，外部磁場による磁束量子だけでなく，2D超電導相に熱的に誘起される非線形励起状態としての磁束量子・反磁束量子対が，輸送現象に本質的に寄与する可能性がある。ここでは，これらが磁束フローを通して，V-I特性や磁気抵抗などの抵抗状態にどのように反映するかを，統計物理学の観点から述べる（**図4**参照）[8),9)]。

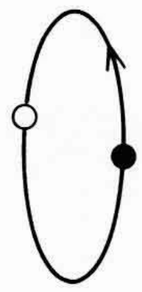
2D超電導相は，現象論的なギンツブルグ・ランダウ理論か



注：出典（参考文献4））

図3　微分磁気抵抗の異常　微分磁気抵抗の磁場依存性（温度77 K）を示す。





磁束量子・反磁束量子対

注：略語説明
I (Transport Current：輸送電流)
H (Magnetic Field：磁場)
F(Lorentz Force：ローレンツ力)
V (Induced Voltage：誘導された電圧)

図4 磁束量子対の解離によるメカニズム(概念図) 2次元面に誘起された磁束量子・反磁束量子対による抵抗状態(概念図)を示す。

ら出発して，磁束量子・反磁束量子(超電導波動関数の2D位相の渦対)によって統計力学的に記述することができる。この磁束量子対は，$q^2\log(r/\xi)$なる形の相互作用(q：結合定数，r：対の長さ，ξ：コヒーレンス長)で束縛された状態にあるが，輸送電流Iが存在すると，互いに束縛された二つの磁束量子には，おのおの反対向きのローレンツ力が働き，系は$U(r)=q^2\log(r/\xi)-qrI$なる山形のポテンシアルに従うようになる。有限温度Tの場合を考えると，磁束量子対が，このポテンシアル障壁$U_{max.}$を熱的に乗り越えて解離する確率が存在する。このとき，輸送電流によって解離した自由な磁束量子数の統計力学的平均値は，対生成，対消滅を考慮して，$n_f \sim \exp(-U_{max.}/2k_BT) \sim I^p$，$p \equiv q^2/2k_BT$ (k_Bはボルツマン定数)と評価される。これらの解離した磁束量子が前述の磁束フローによって抵抗Rに寄与するとし，バーディーン・ステファンの関係式$R=V/I=2\pi\xi^2R_nn_f$ (R_n：常電状態での抵抗率)を用いると，V-I特性のべき乗則$V \sim I^n$，$n=p+1$を得る。ただし，以上の議論では外部磁場の影響を無視した。外部磁場が存在する場合には，磁場によって面内に誘起される渦状の電流によっても，磁束量子が解離することが期待される。このとき，磁場効果によって解離した自由な磁束量子数は，$n_f \sim H^p$のようにふるまうことが上記の議論の拡張として得られ，ゆえに磁気抵抗(V-H特性)に対してもべき乗則$V \sim H^p$が成り立つことが理論的に示唆される。日立製作所での測定結果はこれらの議論によって少なくとも定性的に説明することができ，磁束量子対の生成が抵抗状態に本質的であることが強く示唆される。しかし，かなり強い輸送電流と磁場が同程度に効く領域での指数の電流，または磁場依存性についての定量的な理論解析は今後必要であると考えられる。

有限温度のため，2D超電導相に内在する磁束量子対の統計力学的な集合は，ある温度以上になると，熱的ゆらぎのため自発的に解離し相転移を起こすことがある。この相転移は，いわゆるKT型の転移[10]であり，2D系に特有のトポロジカルな相転移現象である。このとき，系は非オーミックな抵抗状態(磁束量子が束縛した状態)からオーミックな抵抗状態(磁束量子が解離している状態)へと転移する。繰り込み群の理論によると，上述の指数nは，このKT転移の転移温度T_{KT}前後の温度で，ユニバーサルジャンプ($n(T_{KT}-0)=3$，$n(T_{KT}+0)=1$)を示すことが導かれる。指数nの温度依存性を精密に測定した結果によると，ゼロ磁場では指数の変化が比較的滑らかなのに対して，有限磁場中では$n=3$となる温度(KT転移点)でユニバーサルジャンプに対応すると思われる特異な折れ曲がりが見いだされる。また，磁気抵抗の指数の温度依存性に対しても，T_{KT}で同様な折れ曲がり($m(T=T_{KT})=2$)が見られる。このように，磁場をかけることによってKT転移の明確な実験的証拠を得たことは，磁束量子のダイナミックスに基づいて酸化物超電導体の固有の特性を理解するうえで重要な知見を与えるものである。最近，横浜国立大学のグループ[11]や，グルノーブル(フランス)のグループ[12]が，ゼロ磁場でのV-I特性(Y系サンプル)のべき乗則を報告していた。また，日立製作所とは独立に，AT&T社ベル研究所(米国)のグループ[13]が，磁気抵抗(Bi系サンプル)のべき乗則を発見している。これらの結果は，いずれもKT転移の存在を示唆できるものであるが，本論文では良質のY系薄膜サンプルでの結果として，広い(I，H)領域でのI-V特性と磁気抵抗のべき乗則の共存，新しい非線形法則〔(3)式〕，磁場中でのKT転移の明確な証拠，を得たことを強調しておく。

4 結 言

Y系酸化物超電導体である良質の薄膜単結晶$ErBa_2Cu_3O_{7-x}$に対し，四端子法を用い磁場中で誘起される電圧を測定した。その結果，超電導転移温度以下の温度で，特徴的な磁場中非線形抵抗状態を見いだした。測定結果をまとめると，

(1)　液体窒素温度(77 Kに固定)での結果：V-I特性と磁気抵抗(V-H特性)は共に類似なべき乗則に従い，かつその指数も類似である。指数の値は電流あるいは磁場に依存し，測定範囲で3～7の非普遍的な値をとる。また，微分磁気抵抗は特徴的な構造を持ち，特に，べき乗則から示唆される臨界磁場0.07 Tの近傍で鋭い変化を示す。

(2)　V-I特性および磁気抵抗のべき乗則について，指数nとmの温度依存性を調べ，それぞれが$n=3$，$m=2$となるような温度で特異な折れ曲がりを示すことを見いだした。

酸化物超電導体の持つ2次元的な構造のもと，大きな熱的ゆらぎによって超電導相に励起した磁束量子・反磁束量子対が，外部から加えた輸送電流や磁場によって解離するというシナリオから，上記のべき乗則を定性的に理解することができる。また，各指数の温度依存形に見られる特異点は，磁束量子対が熱的に解離したときに起こる2次元系特有のコスタリッツ・サウレス転移を反映しているものと結論される。また，そこでは磁場効果が重要であると考えられる。

本論文では，非線形電導現象を示す実験結果をもとに，酸化物超電導体での磁束量子のダイナミックスの物理的描像を論じたが，今後は，この描像をより定量的に理解するとともに，他の摂動的因子(例えば，ピンニングの効果，3次元性など)の効果を調べていく必要があると思われる。

本研究を行うに当たり，有益な議論をしていただいた東京大学の中嶋貞雄名誉教授，東北大学の大塚泰一郎名誉教授，および米国カリフォルニア大学サンタバーバラ校のJ. R. Schrieffer教授に対し深く感謝する。

参考文献

1)　北沢，外：酸化物超電導体の構造と物性，応用物理，Vol.**57**, No.11, pp.1644～1665(1988)

2)　Tinkham：**Introduction to Superconductivity**, McGraw-Hill(1975)

3)　A. Khurana：High Temperature Supercurrents may not be Forever, Phys. Today, Vol.**42**, No.3, pp.17～21(1989)

4)　T. Onogi, et al.：Power-Law Dissipative Behavior in High-Tc Superconductor, Solid State Commun. Vol.**69**, No.10, pp.991～993(1989)

5)　Y. B. Kim, et al.：Flux Flow and Irreversible Effects, **Superconductivity**, eds. by R. D. Park, Marcel Dekker, pp.1107～1165(1969)

6)　T. Aida, et al.：Microstructures and Superconductivities of $LnBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ Thin Films, **Advances in Superconductivity**, eds. by K. Kitazawa and T. Ishiguro, pp.593～598, Springer-Verlag(1989)

7)　A. Umezawa, et al.：Anisotropy of the Lower Critical Field, Magnetic Penetration Depth, and Equilibrium Shielding Current in Single Crystal $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, Phys. Rev. B Vol.**38**, No.4, pp.2843～2846(1988)

8)　J. E. Mooij：Two-dimensional Transition in Superconducting Films and Junction Arrays, **Percolation, Localization and Superconductivity**, eds. by A. M. Goldman and S. A. Wolf, pp.325～369, Plenum(1983)

9)　B. I. Halperin, et al.：Resistive Transition in Superconducting Films, J. Low Temp. Phys. Vol.**36**, Nos.5/6, pp.599～616(1979)

10)　J. M. Kosterlitz, et al.：Ordering, Metastability and Phase Transitions in Two-Dimensional Systems, J. Phys. C Vol.**6**, No.7, pp.1181～1203(1973)：J. M. Kosterlitz：The Critical Properties of Two-Dimensional XY Model, J. Phys. C Vol.**7**, No.6, pp.1046～1060(1974)

11)　M. Sugahara, et al.：Possibillity of Kosterlitz-Thouless Effect at the Resistive Transition of High-Tc Oxide Superconductors, Phys. Lett. A Vol.**125**, No.8, pp.429～431(1987)

12)　P. C. E. Stamp, et al.：Kosterlitz-Thouless Transition of Fluxless Solitons in Superconducting $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ Single Crystals, Phys. Rev. B Vol.**38**, No.4, pp.2847～2850(1988)

13)　S. Martin, et al.：Vortex-Pair Excitation near the Superconducting Transition of $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$ Crystals, Phys. Rev. Lett. Vol.**62**, No.6, pp.677～680(1989)

論文抄録

プラスチック製品と包装箱の荷重分担(2)

日立製作所　長谷川淳英

包装技術
25, 12, 1042～1045(昭62-12)

倉庫保管中に包装品に加わる積圧荷重は，製品と包装の両者によって分担支持されている。この荷重負担比率は一定ではなく，周囲の環境条件などによって変動することがわかっている。

荷重負担比率の変動状況を詳細に調べてみると，時間の経過とともに製品の荷重負担部分を増大させる成分(クリープ成分)と，相対湿度の変動にリンクして増減を繰り返す部分(変動成分)に分けることができ，両者を組み合わせることで荷重負担比率の変動状況を表現することが可能である。

本報告では，包装品を簡略化した力学モデルで表し，段ボールの相対湿度と伸びの関係を利用して，荷重負担比率の変動を推定するための式を誘導した。

また，この式と実測結果の比較を行った結果，簡略モデルであるにもかかわらず，かなり良い適合度を示すことがわかった。

ヒューリスティックな探索手法を用いたプラントレイアウト修正方式

日立製作所　満田　透・森本美恵・他２名

情報処理学会論文誌
29, 6, 561～569(昭63-6)

プラントのレイアウト計画で，機器・配管配置の総合的改善を効率的に行うためのレイアウト修正方式を作成した。本方式では，ある機器・配管の配置修正の他への影響をツリー構造のグラフで表現し，これを探索することによって与えられた部分修正を制約条件として満足し，全体の配管経路長を短縮できるレイアウト修正案を自動的に求める。

探索を効率化するために，問題解決に関する知識を利用する。知識は，探索戦略に関する知識と配置条件に関する知識から成り，ルール形式で表現し，３階層に分類した処理の種類ごとにグループ化して利用する。階層は，処理内容の決定，修正機器・配管の選択，機器・配管の最適配置に分類され，各階層間の情報の伝達は共通のワークエリアで実施する。

本方式をう回配管解消の例題に適用し，設計支援に有効であることを確認した。

サーボモータ用高分解能ディジタル速度検出方法の検討

日立製作所　杉浦康之・渡部　満・他３名

電気学会論文誌 D
108, 1, 69～79(昭63-1)

マイクロコンピュータを用いてディジタル制御を行うサーボモータで，正弦波エンコーダを速度センサとして速度制御範囲が広域で，低速領域でも高分解能を持つ速度検出方法を開発した。位置の検出は正弦波エンコーダの零点を切る時点でパルスを発生させ，このパルスをカウンタで計数し粗位置とする。零点パルス間は正弦波エンコーダのA相とB相のアナログ値をディジタル値に変換し，$\tan\theta$のテーブルを引くことによって微細位置を測定する。粗位置と微細位置を併せて位置とするとき，サンプリング時間ごとの位置の差分が速度となる。本方式によって１回転2,500サイクルのエンコーダを使用し，位置の分解能は128万パルス相当を得た。また，本方式をACサーボモータに適用して極低速(0.05 r/min)での速度制御を実現した。