

図 3.3(a), (b). (a) κ -(BEDT-TTF) $_2$ Cu(NCS) $_2$ の伝導面に垂直磁場を印加したときの磁気抵抗. (b) その Fourier 変換¹⁷⁾.

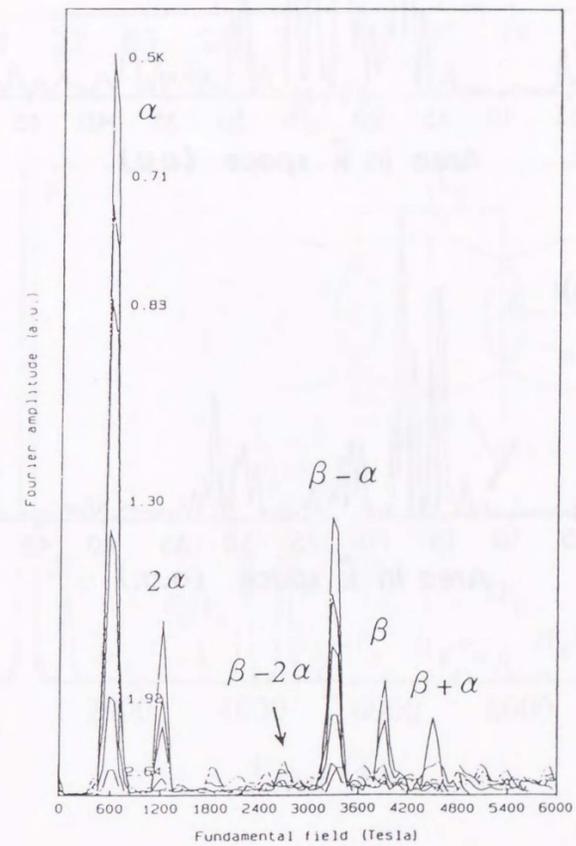
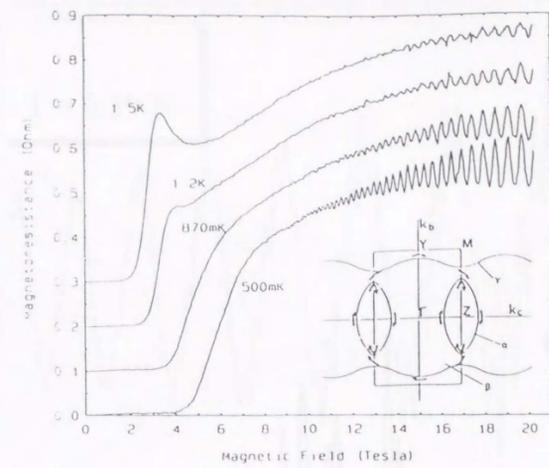


図 3.3(c). κ -(BEDT-TTF) $_2$ Cu(NCS) $_2$ の伝導面に垂直磁場を印加したときの磁気抵抗 (上図) とその Fourier 変換 (下図)^{22,23)}.

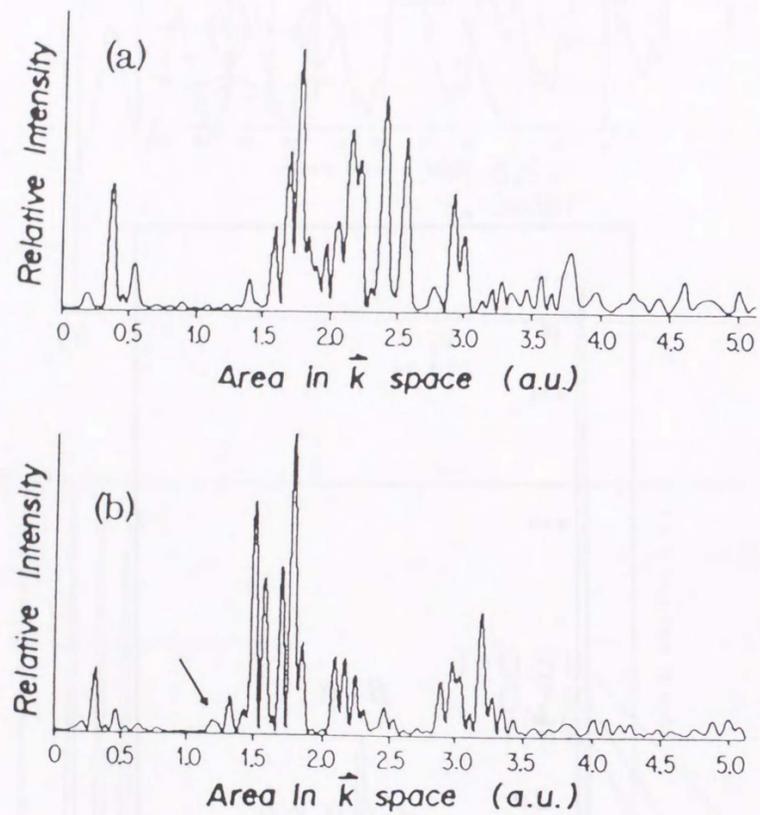


図 3.4. マグネシウムに関する磁化測定から得られた磁場の強さの逆数に関する Fourier 変換¹¹⁾. (a) と (b) は Fourier 変換領域が異なる. それぞれ, $5.011\text{T} < H < 5.025\text{T}$ と $5.025\text{T} < H < 5.039\text{T}$. 若干, 領域をずらしただけで, 波形が不安定になっている. Falicov-Stachoviak 理論では許されない軌道に対応するピークは, 例えば (b) の 1.255a.u. である. 矢印を添えておく.

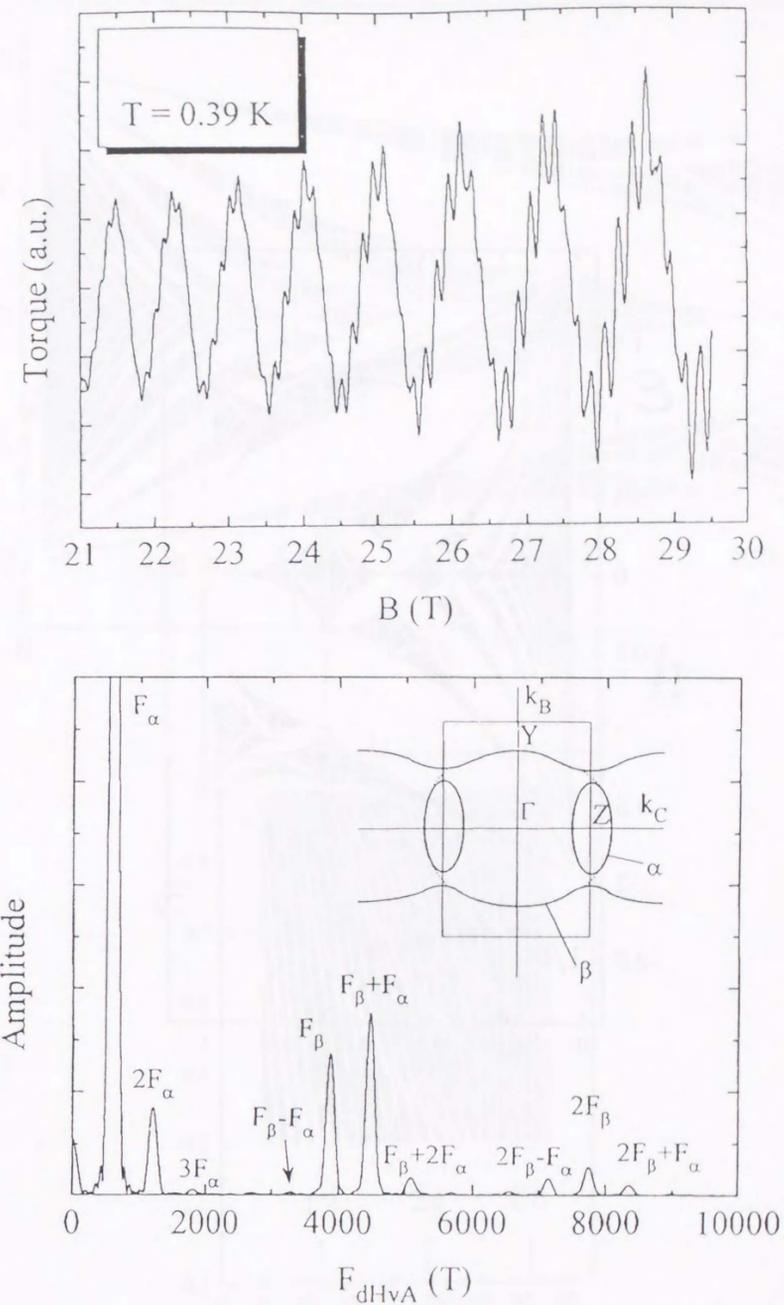


図 3.5. κ -(BEDT-TTF)₂Cu(NCS)₂ の伝導面に垂直磁場を印加したときの磁化 (上図) とその Fourier 変換 (下図)¹²⁾.

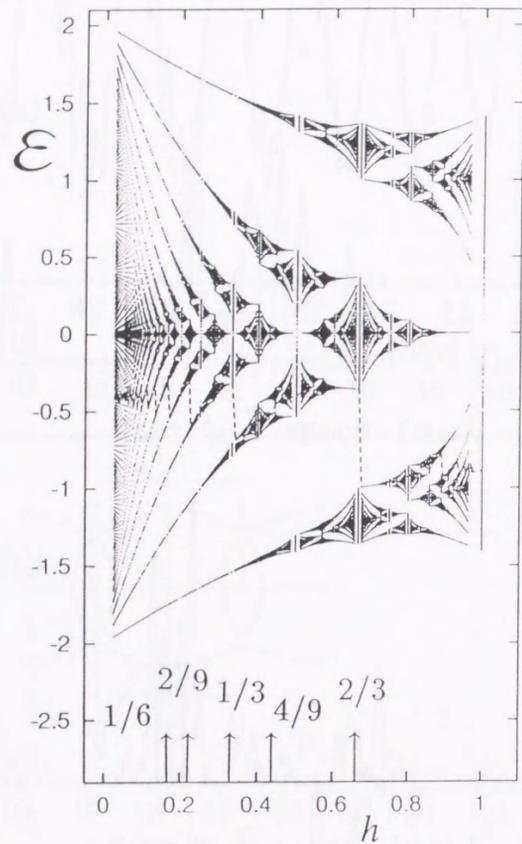


図 3.6(a). $\nu = 0$ における磁場中のエネルギーバンド構造. 横軸は h である. ある h での全エネルギー固有値を一次元軸上に投影した図である. フィリングが $2/3$ のときのフェルミエネルギーが破線で記されている.

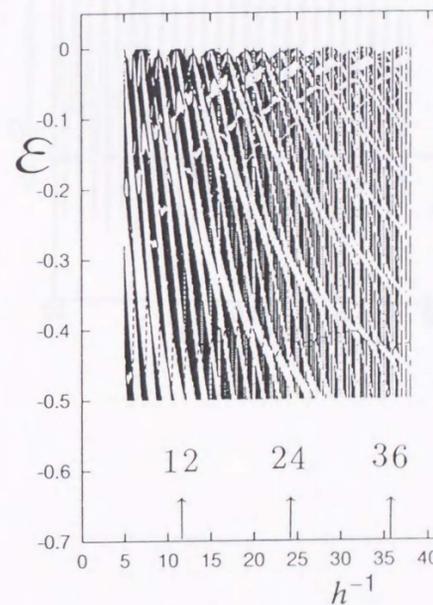
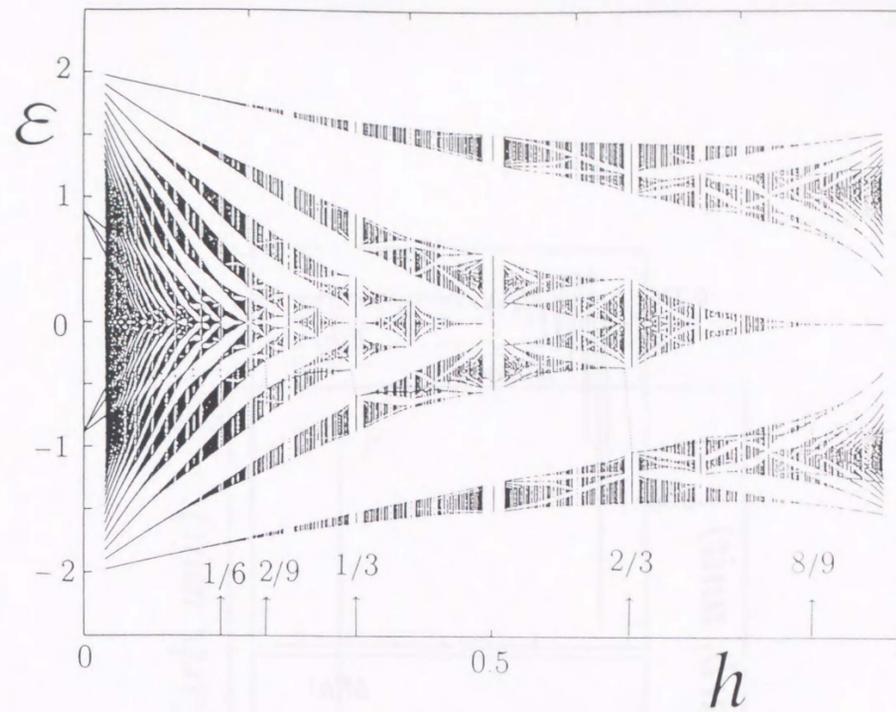


図 3.6(b), (c). (b) $\nu = 0.18$ における磁場中のエネルギーバンド構造 (上図). フィリングが $2/3$ のときのフェルミエネルギーが破線で記されている. (c) 図 (b) の拡大図 (下図). 但し, 横軸を h の逆数としている. 破線はフィリングが $2/3$ のときのフェルミエネルギーである.

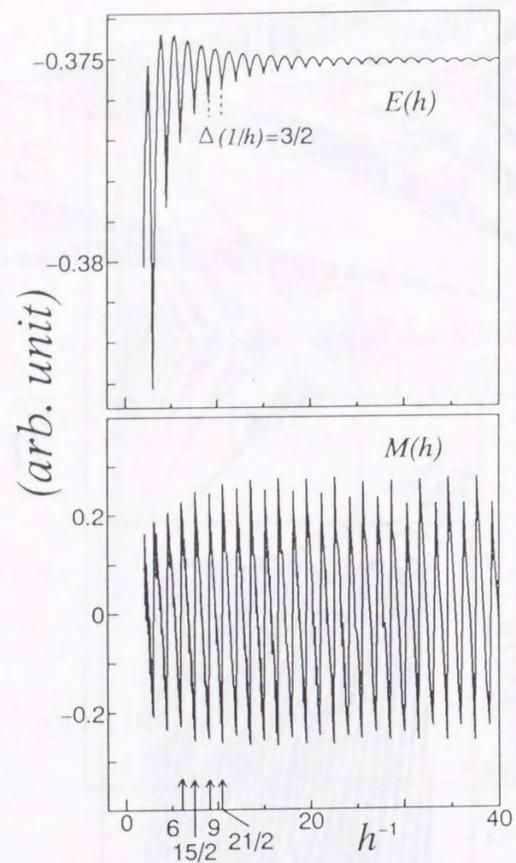


図 3.7(a). $T=0, v=0$ フィリング $2/3$ におけるエネルギー E とそれに対する磁化 M . 両者とも横軸を h の逆数としている.

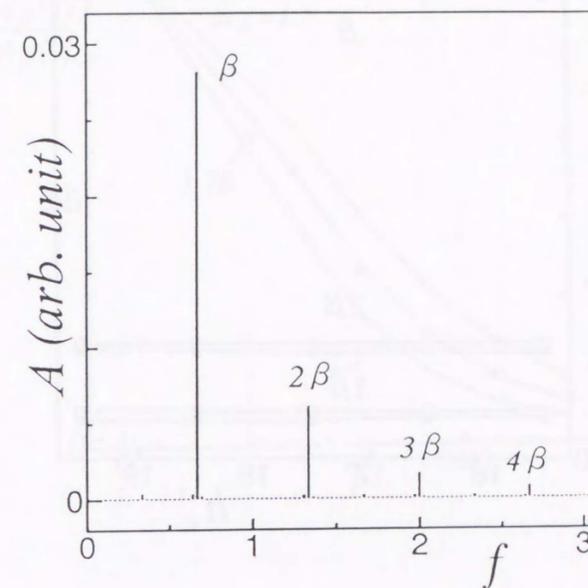


図 3.7(b). M の FTA ($A(f)$). 横軸は周波数 (f) である. Fourier 変換の領域は $4 \leq h^{-1} \leq 40$.

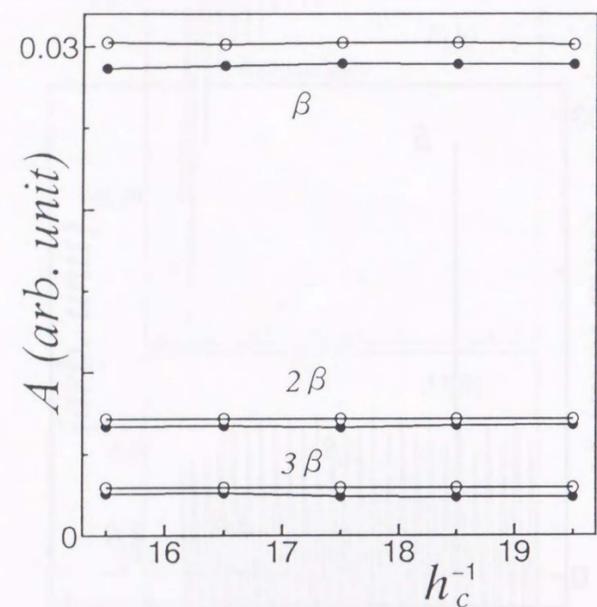


図 3.7(c). 周波数 $f_\beta, f_{2\beta}, f_{3\beta}$ に関する, $M(h^{-1})$ と $M^{LK}(h^{-1})$ の FTA の磁場依存. 横軸は Fourier 変換の領域の中心 h_c^{-1} である. \circ が $A_j^{LK}(h_c^{-1})$ であり, \bullet が $A_j(h_c^{-1})$ である. Fourier 変換領域の幅 $2L$ は 21

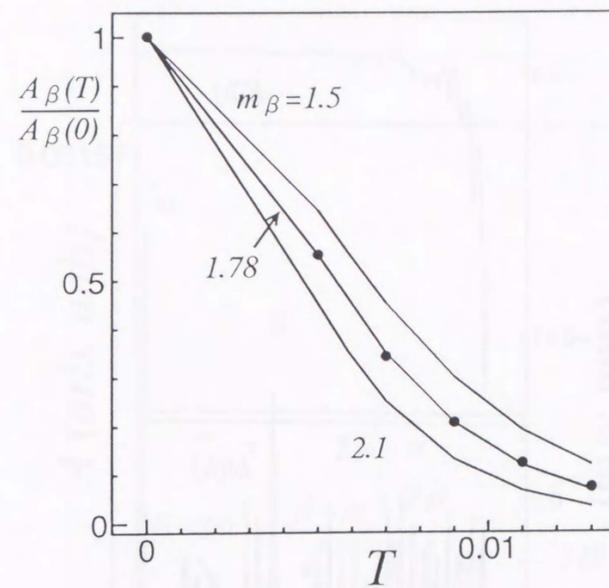


図 3.8. $v=0$, フィリング $2/3$ における β 振動に関する M と M^{LK} の FTA の温度依存. \bullet が $A_\beta(T)/A_\beta(0)$ である. 実線は様々な m_β に対する $A_\beta^{LK}(T)/A_\beta^{LK}(0)$ である. Fourier 変換の領域は $14 \leq h^{-1} \leq 38$.

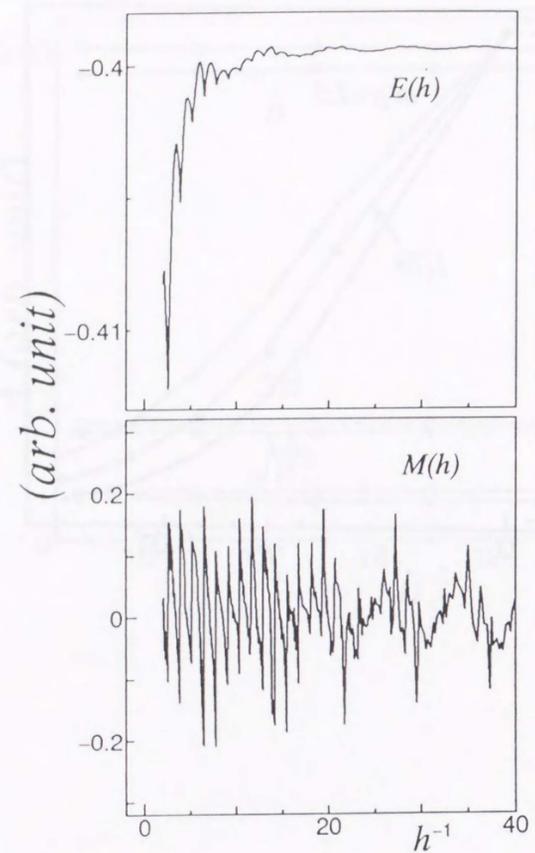


図 3.9(a). $T=0, \nu=0.18$ フィリング $7/9$ におけるエネルギー E とそれに対する磁化 M . 両者とも横軸を h の逆数としている.

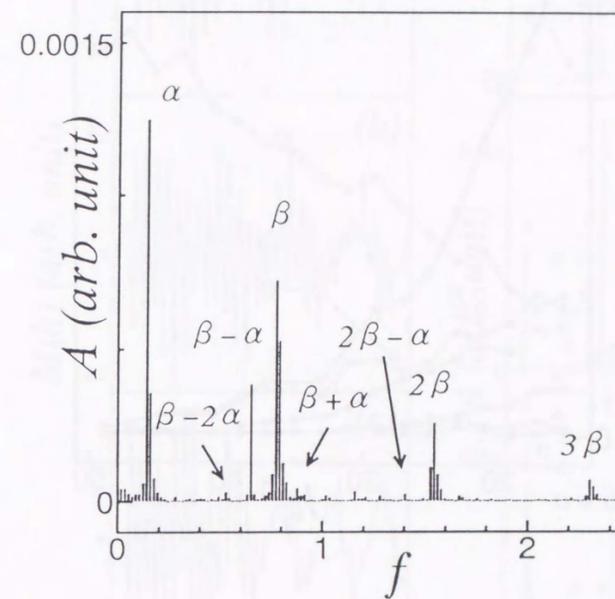


図 3.9(b). M の FTA ($A(f)$). 横軸は周波数 (f) である. Fourier 変換の領域は $4 \leq h^{-1} \leq 60$.

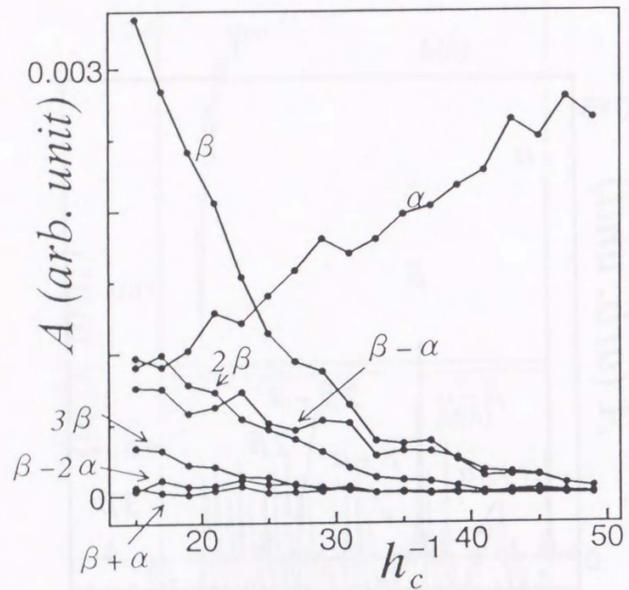


図 3.9(c). 様々な周波数 ($f_\beta, f_{2\beta}, f_{3\beta}, f_\alpha, f_{\beta-\alpha}, \dots$) に関する, $M(h^{-1})$ と $M^{\text{LK}}(h^{-1})$ の FTA の磁場依存. 横軸は Fourier 変換の領域の中心 h_c^{-1} である. ●が $A_j^{\text{LK}}(h_c^{-1})$ である. Fourier 変換領域の幅 $2L$ は 22

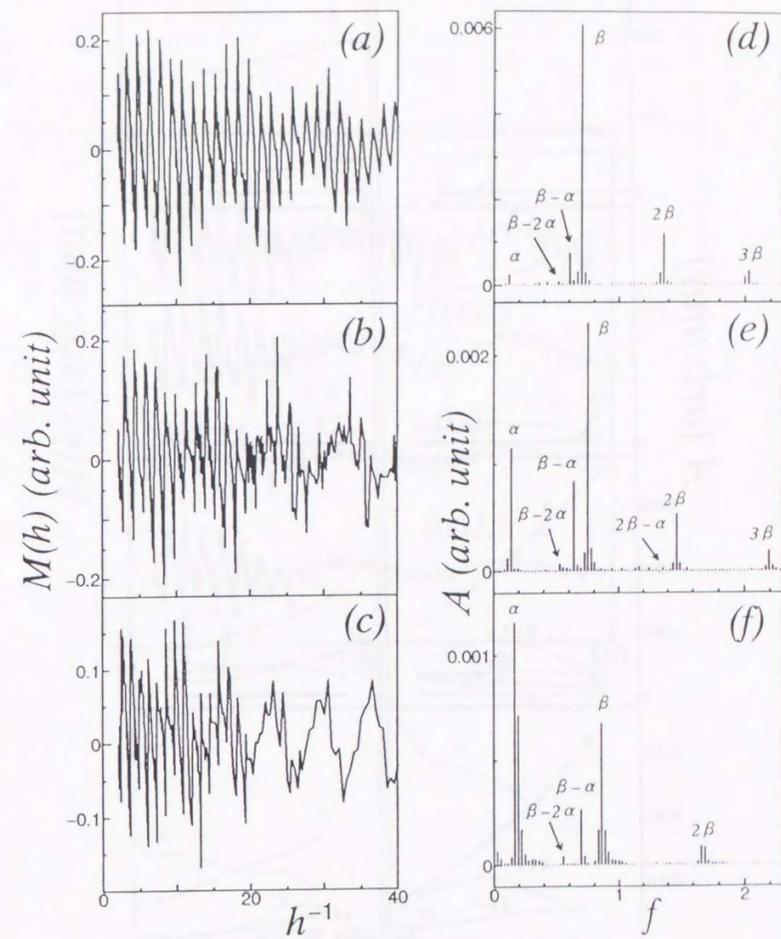


図 3.10. $T=0$ における $M(h^{-1})$ (左列) とそれに対応する Fourier 変換 (右列). (a) と (d) が $\nu = 0.12$ でフィリング $2/3$ であり, (b) と (e) が $\nu = 0.18$ でフィリング $13/18$ であり, (c) と (f) が $\nu = 0.22$ でフィリング $5/6$ である

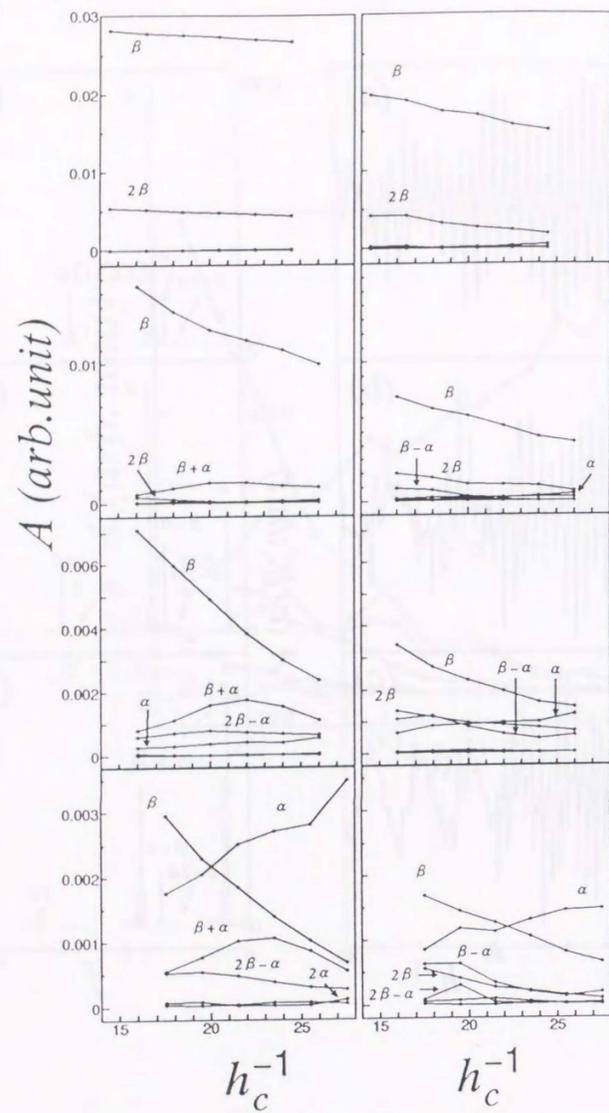


図 3.11. $T = 0$ における様々な軌道 j に関する A_j^{FS} (左列) と A_j (右列) の磁場依存の比較. Fourier 変換領域の幅 $2L$ は $v = 0.04$ のとき 21 であり, $v = 0.12$ と $v = 0.18$ のとき 24 であり, $v = 0.22$ のとき 27 である.

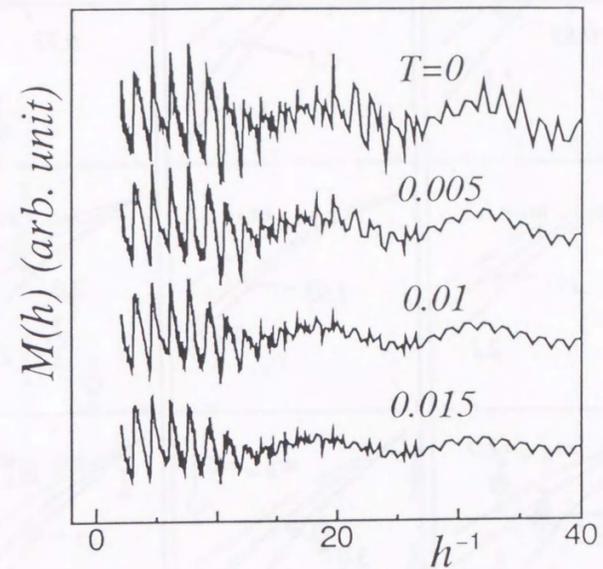


図 3.12. $T = 0, 0.005, 0.01, 0.015$ における $M(h^{-1})$. $v = 0.22$ である.

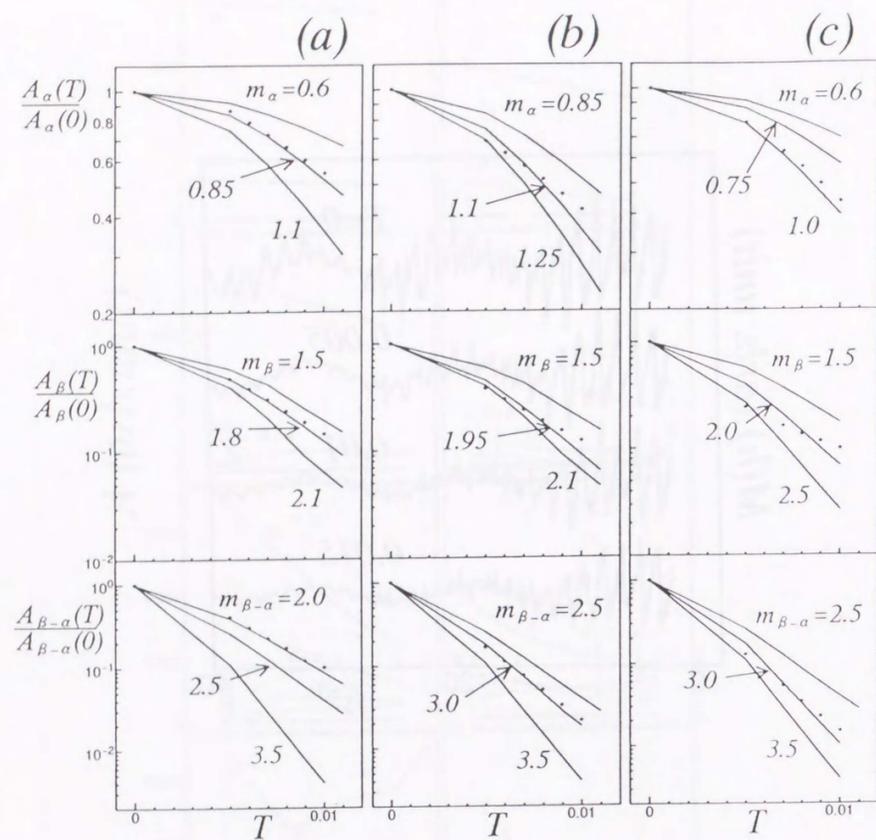


図 3.13. α , β , β - α 振動に対する M と M^{FS} の FTA の温度依存. 上から下の順に α , β , β - α に対応する. ● は $A_j(T)/A_j(0)$ である. 実線が幾つかの m_j に対する $A_j^{\text{FS}}(T)/A_j^{\text{FS}}(0)$ である. (a) $\nu = 0.12$, (b) 0.18 , (c) 0.22 . Fourier 変換領域は (a) と (b) で $14 \leq h^{-1} \leq 38$, (c) で $14 \leq h^{-1} \leq 41$ である.

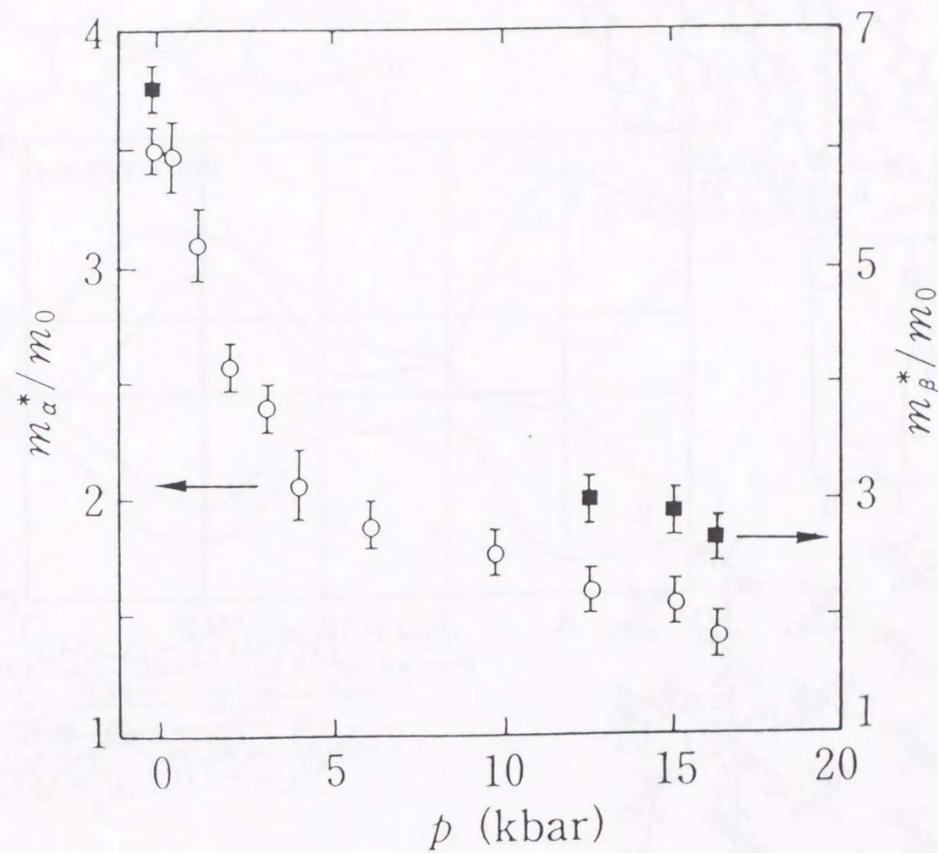


図 3.14. κ -(BEDT-TTF) $_2$ Cu(NCS) $_2$ の伝導面に垂直磁場を印加したときの SdH 観測から得られたサイクロトロン有効質量の圧力依存¹⁷⁾. ○ が α 軌道, ■ が β 軌道に対応する有効質量 m_α, m_β .

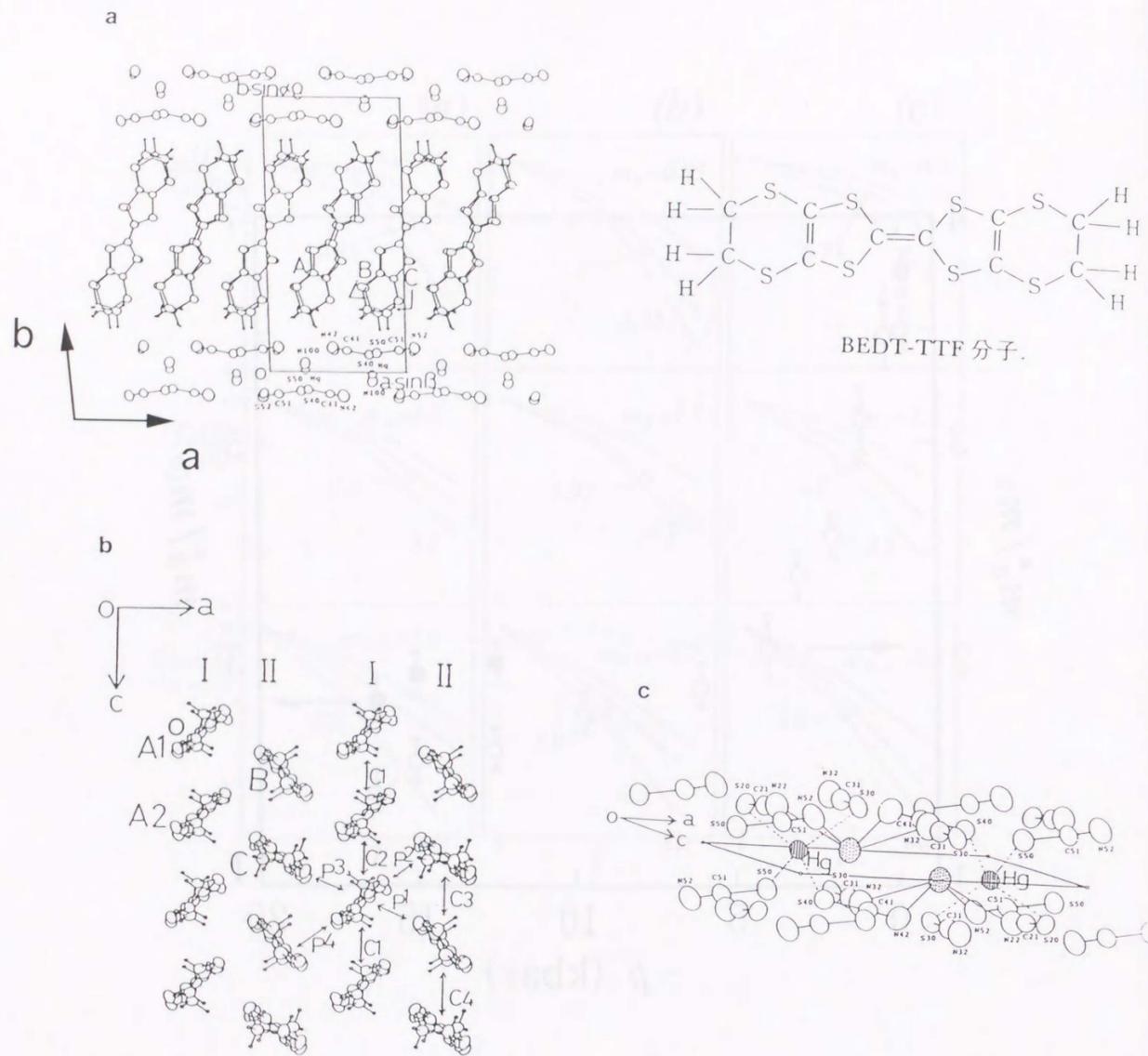


図 4.1. α -(BEDT-TTF) $_2$ KHg(SCN) $_4$ の結晶構造. (a)は結晶軸のc軸方向から見た図である. 四角で囲まれた部分がa-b面についての単位格子である. 各辺がそれぞれ格子定数になる. (b)はb軸方向からの図. (c)はa-c面内のKHg(SCN) $_4$ 分子の配向を示している.

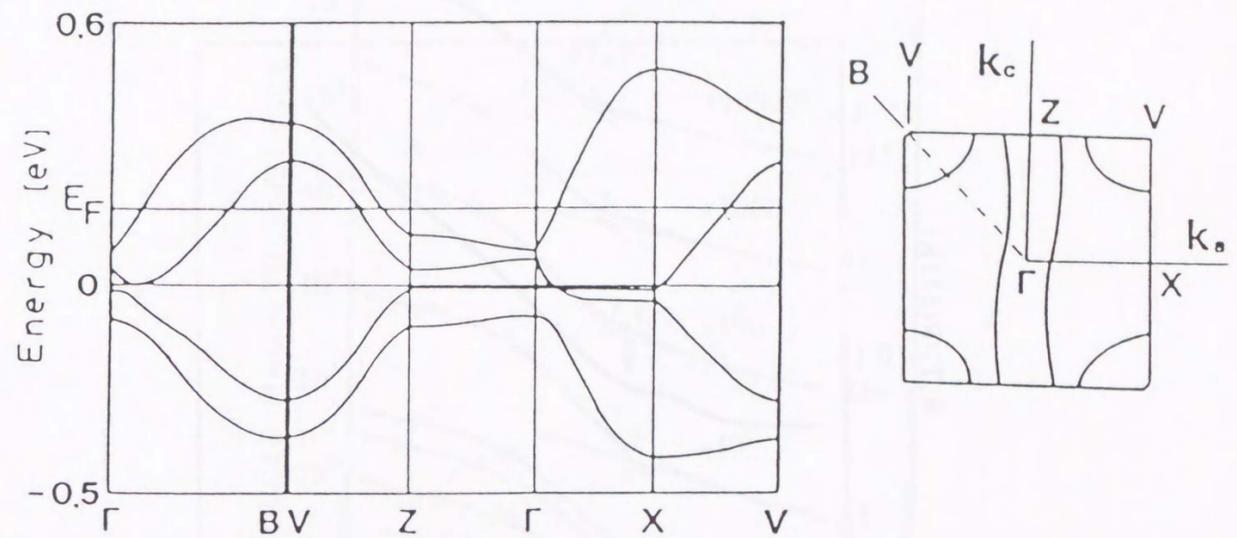


図 4.2. 拡張Hückel法から計算された α -(BEDT-TTF) $_2$ KHg(SCN) $_4$ のエネルギーバンド構造.

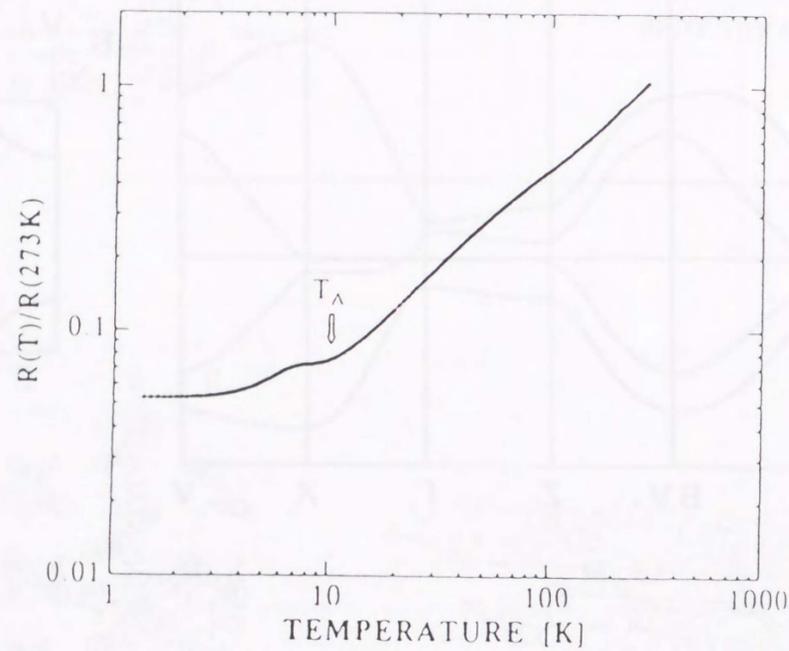


図 4.3. α -(BEDT-TTF) $_2$ KHg(SCN) $_4$ のゼロ磁場下における伝導面方向の電気抵抗の温度変化の測定結果³⁰⁾.

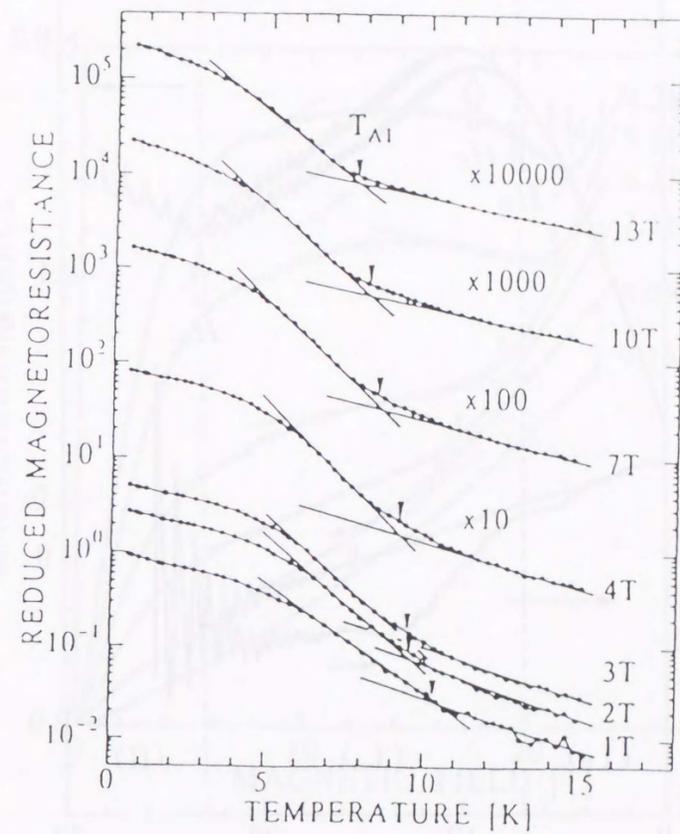


図 4.4. α -(BEDT-TTF) $_2$ KHg(SCN) $_4$ の伝導面上に、垂直磁場を印加した場合の伝導面方向の電気抵抗の温度変化の測定結果³⁰⁾. 様々な磁場の値 (1T から 13T まで) に関して示してある.

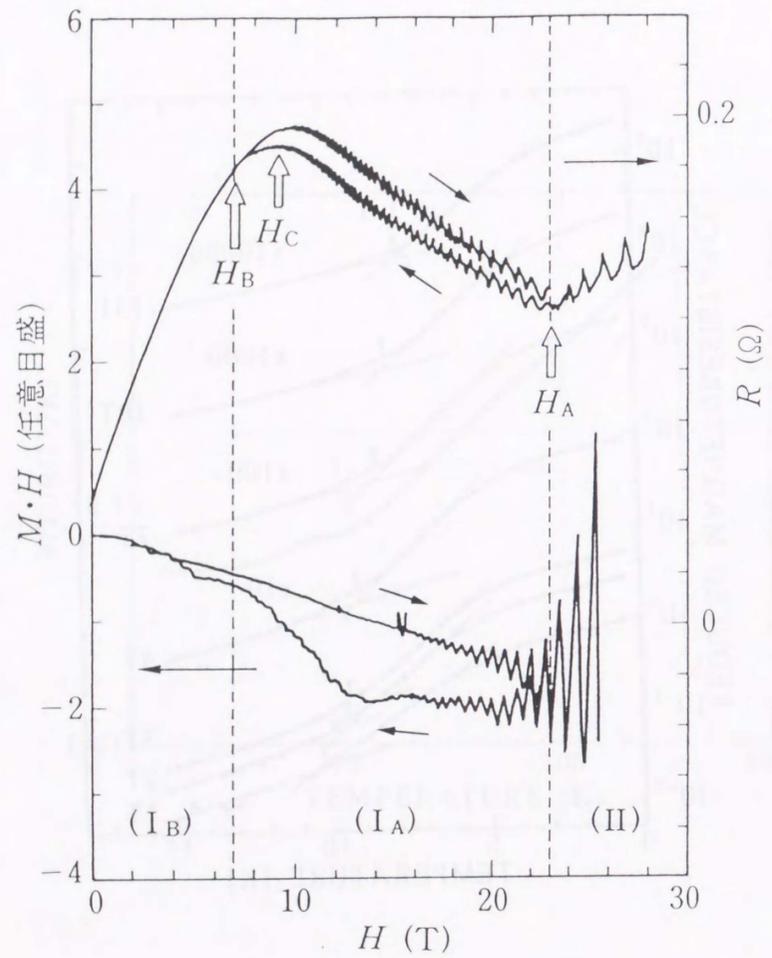


図 4.5. α -(BEDT-TTF) $_2$ KHg(SCN) $_4$ の伝導面上に、垂直磁場を印加した場合の伝導面方向の電気抵抗(上側)と磁化(下側)の磁場変化の測定結果³⁰⁾。非常に長いヒステリシス領域(約7.5Tから約24Tまで)が存在している。温度は0.75Kである。

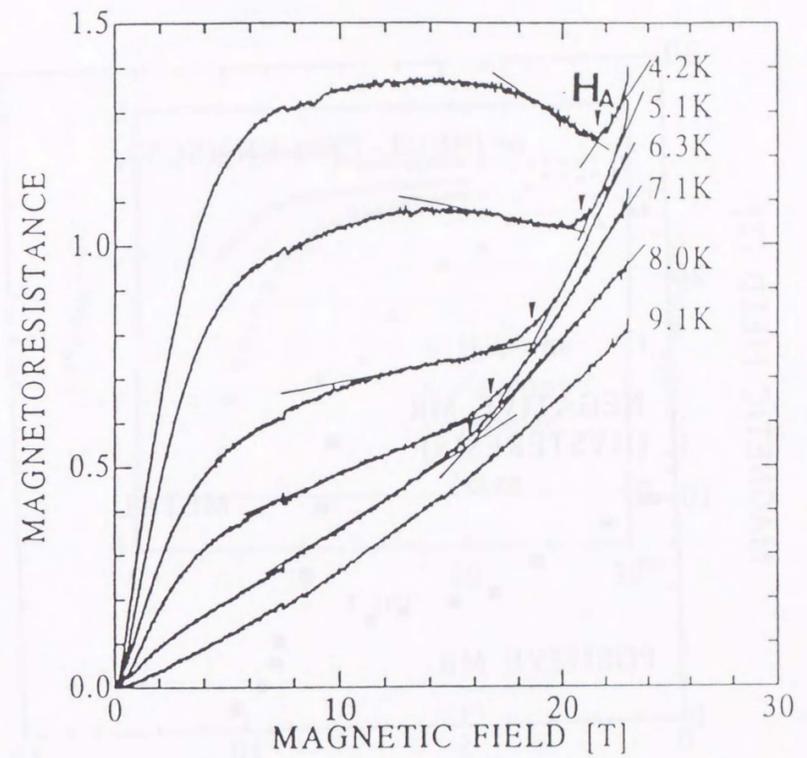


図 4.6. 磁気抵抗におけるキंक磁場(H_A)の温度変化³⁰⁾。図 4.5と同様な測定である。

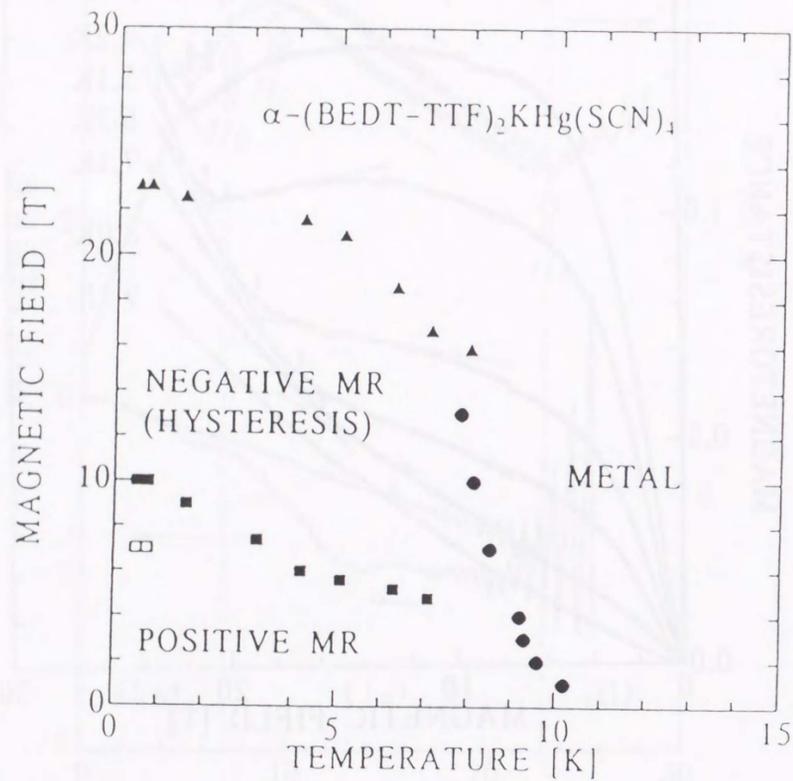


図 4.7. α -(BEDT-TTF)₂KHg(SCN)₄の温度-磁場相図³⁰⁾. ●が T_{A1} , ▲が H_A , □が H_B , ■が H_C である.

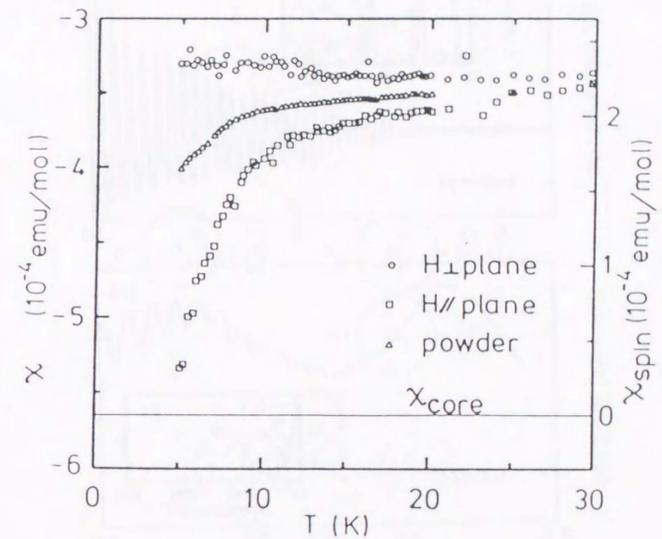


図 4.8. α -(BEDT-TTF)₂KHg(SCN)₄の帯磁率の温度変化³⁴⁾. 伝導面に垂直磁場を与えた場合の帯磁率 (○) は温度に関して一定であるが, 平行磁場を与えたの帯磁率 (□) が約 10K で急激に減少していることがわかる. △は粉末の試料による帯磁率である. △は○と□の中間的な振る舞いをしている.

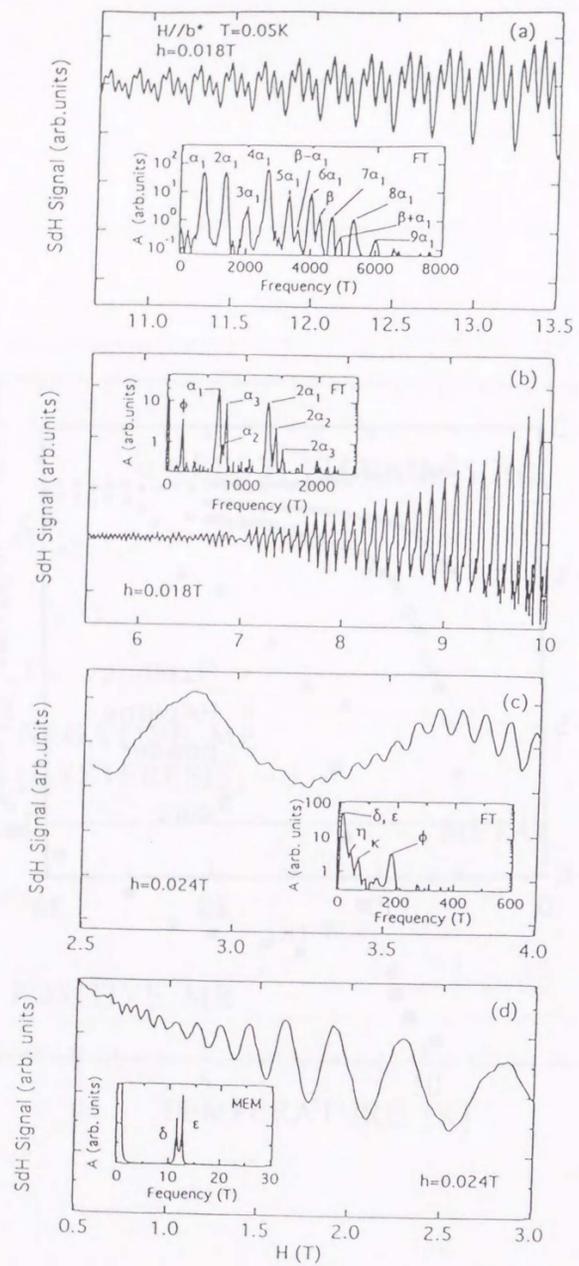


図 4.9. α -(BEDT-TTF)₂TIHg(SCN)₄の様々な磁場領域に関する SdH 観測結果³⁸⁾. 温度は 0.05K である. 伝導面に垂直磁場が印加されている.

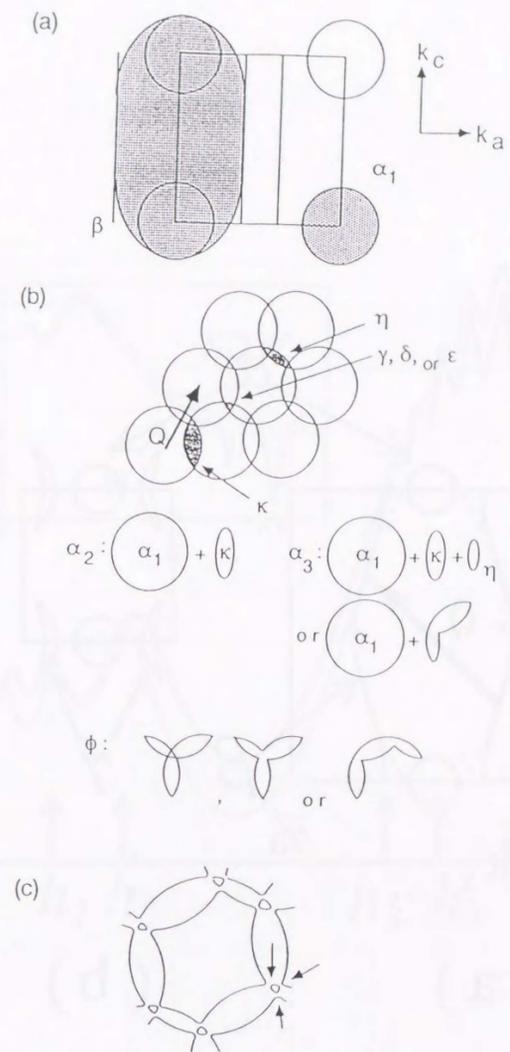


図 4.10. 図 4.9 の SdH 振動の周波数から予想される, SDW ネスティングにより再構成されたフェルミ面の形状³⁸⁾. (a) は正常状態のフェルミ面. (b) は SDW ネスティングにおいて, 作り出される軌道を示している. 一次元的なほとんど平行な開いたフェルミ面のネスティング後は, α_1 軌道が重なり合っている. (c) は SDW 形成後のフェルミ面.

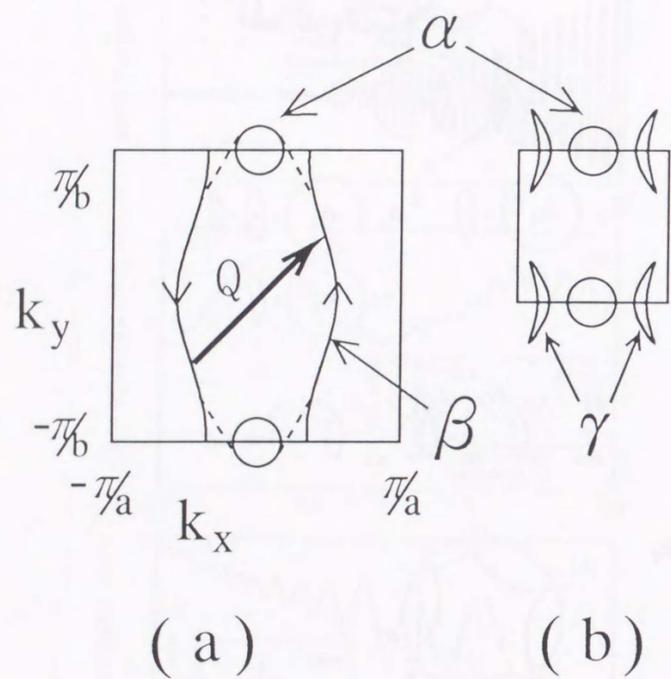


図 4.11. 左側の (a) がフィリングは $1/4$, $v = 0.18$ において我々のモデルを用いて計算されたフェルミ面. 正常状態のフェルミ面である. 右側の (b) が, (a) に SDW ネスティングを行った後のフェルミ面. ネスティングベクトル $Q = (\pi/a, \pi/b)$ である. ほとんど平行な開いたフェルミ面がネスティング後に消滅している. 一方で, 不完全ネスティングにより小さな閉軌道 (γ) が存在している. また, ここでは β 軌道と α 軌道が定義されている.

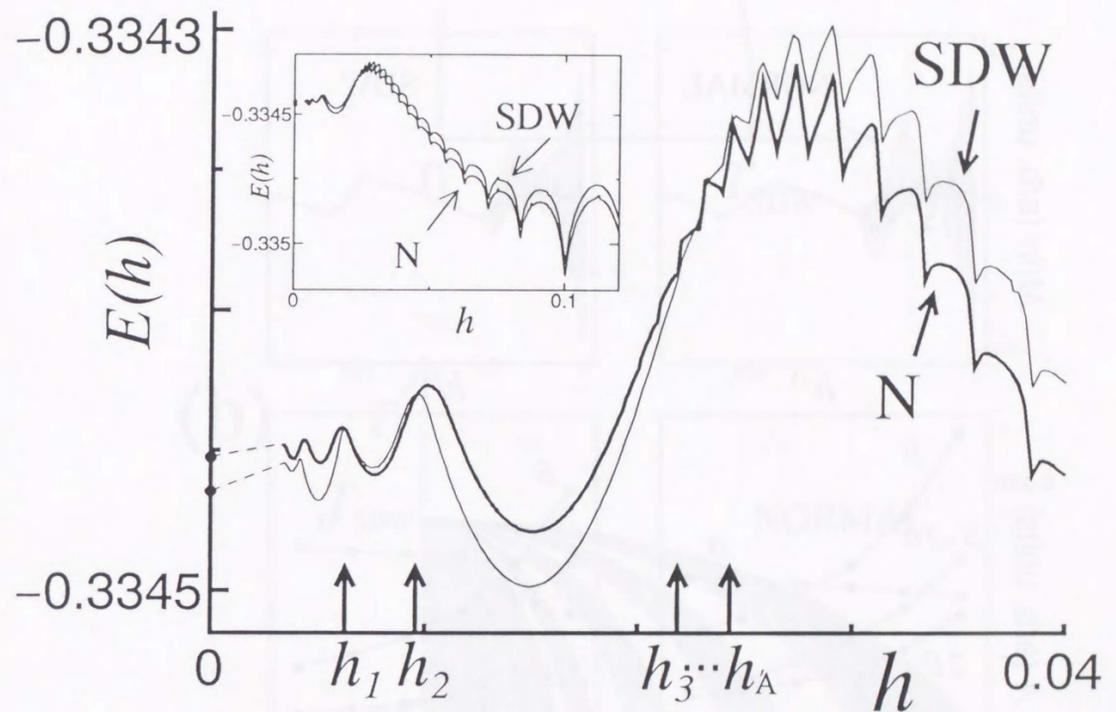


図 4.12. 弱磁場領域における, h の関数としての正常状態 (N) と SDW 状態 (SDW) についてのそれぞれのエネルギー. $h = 0$ で $10^{-6}t$ 程度の SDW 利得により SDW 状態が安定化されている. 両曲線の交点が矢印で記してある. 交点 h_1, h_2, \dots, h_A が複数の一次転移磁場である. 挿入図は, 広い h 領域に関する両曲線. 強磁場で正常状態が安定化されている.

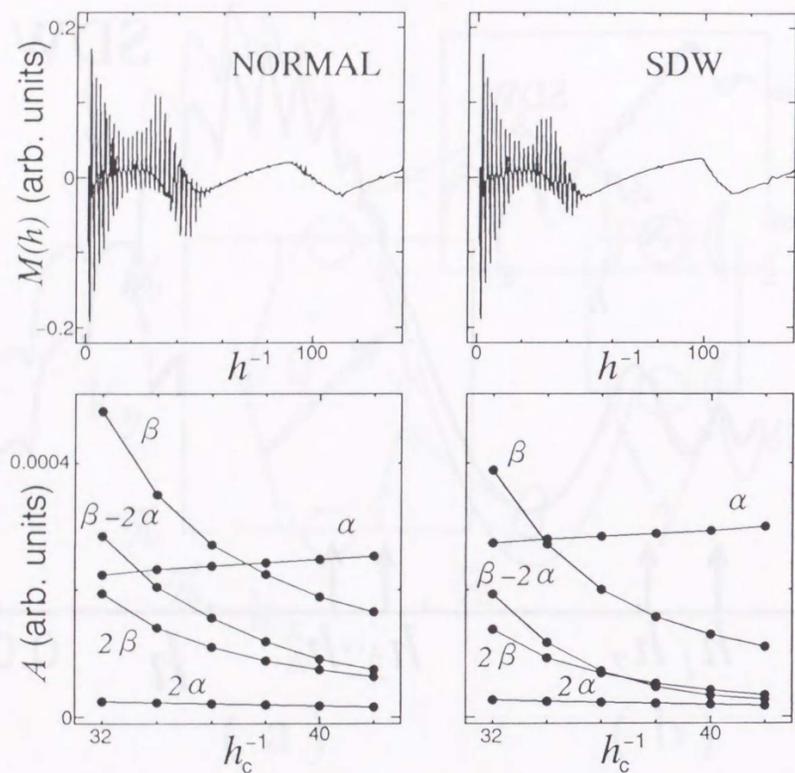


図 4.13. 磁化 ($M(h)$) の h^{-1} 依存 (上段). $M(h)$ の Fourier 変換から得られた様々な軌道 ($\alpha, 2\alpha, \beta, \beta-2\alpha, 2\beta$) の FTA の h^{-1} 依存 (下段). それぞれ左側が正常状態 (NORMAL) であり, 右側が SDW 状態 (SDW) である.

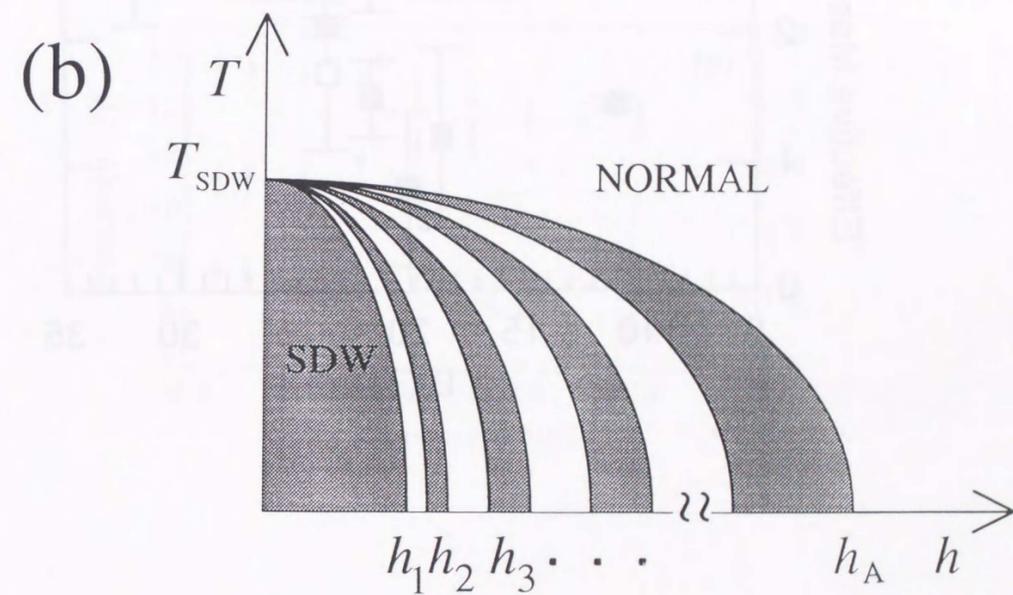
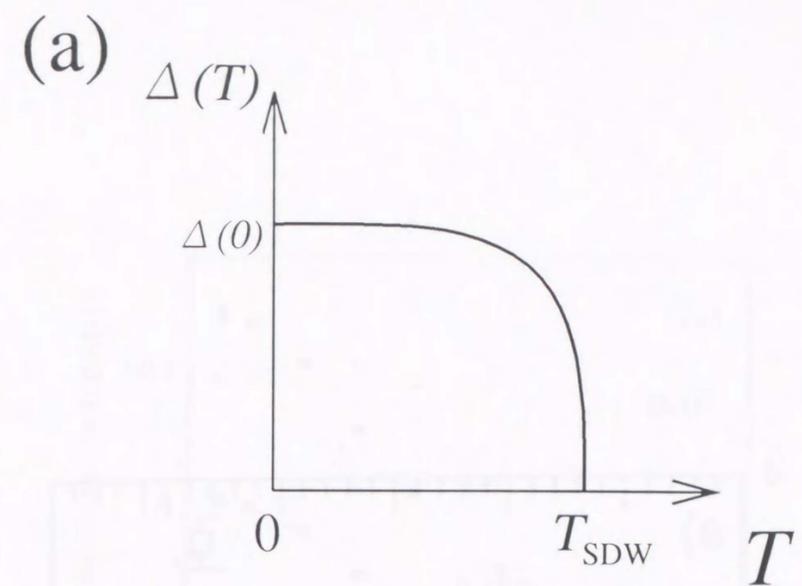


図 4.14. (a) は BCS 理論におけるギャップ $\Delta(T)$ の大きさの温度依存の概念図. (b) は α -(BEDT-TTF)₂MHg(SCN)₄ 系の概念的な T vs h 相図. 斜線部分が SDW 状態を表わし, 一次転移線によって正常状態と分けられている. h_1 から h_A までの逐次一次転移領域がある.

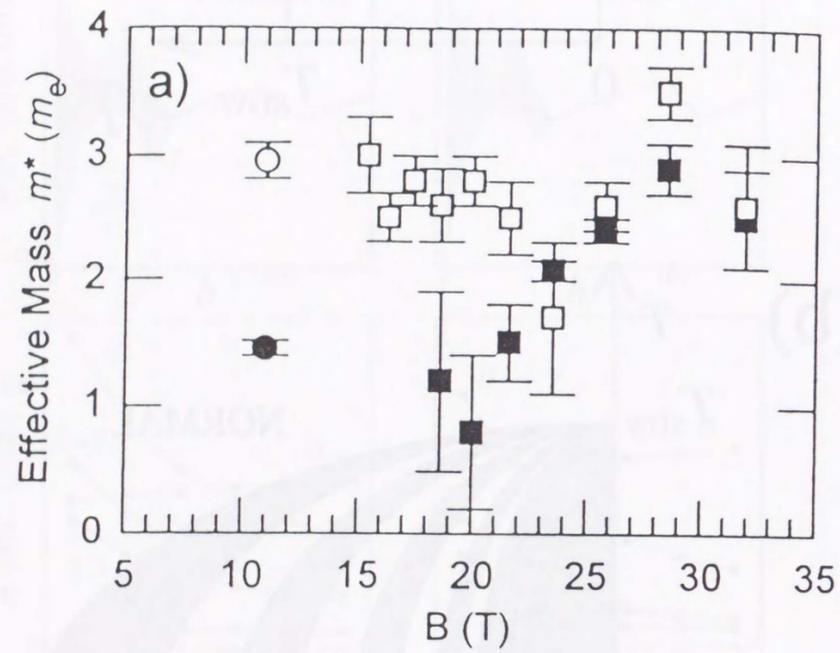


図 4.15. α -(BEDT-TTF)₂KHg(SCN)₄の伝導面上に、垂直磁場を印加した場合の dHvA 測定から得られたサイクロトロン有効質量の磁場依存⁴⁴⁾. ■が基本周波数 f_α についての有効質量. □は第2高調波に対する有効質量.

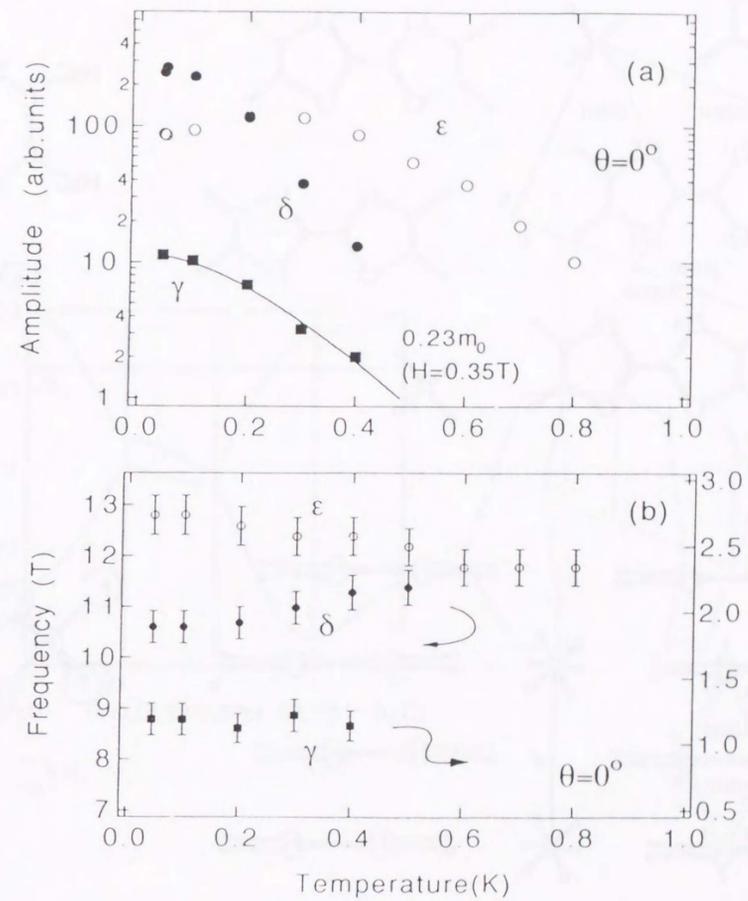


図 4.16. α -(BEDT-TTF)₂TiHg(SCN)₄の伝導面上に、垂直磁場を印加した場合の SdH 測定から得られた各軌道からの振動の振幅 (a) と周波数 (b) の温度依存³⁸⁾.

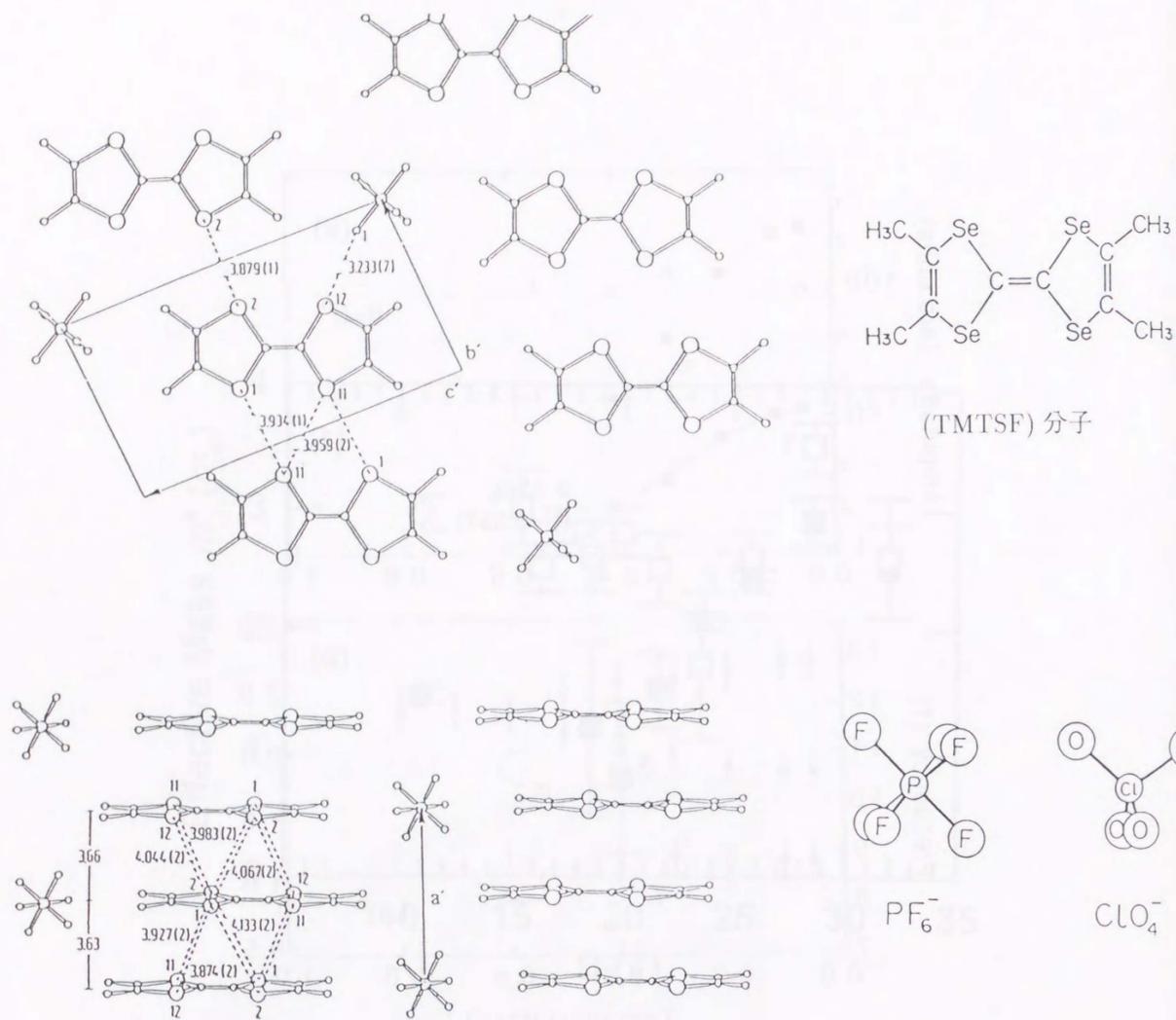


図 5.1. $(\text{TMTSF})_2\text{X}$ の結晶構造. 上図は結晶軸の a 軸に沿う方向から見た図. 四角で囲まれた部分が b-c 面内の単位格子であり, 各辺がそれぞれ格子定数になる. 下図は b 軸方向からの図. a 軸方向の格子間隔が矢印の長さである. (TMTSF) 分子と陰イオンの配置される位置がわかる. 図内の距離を示す数字はÅ の単位を持つ.

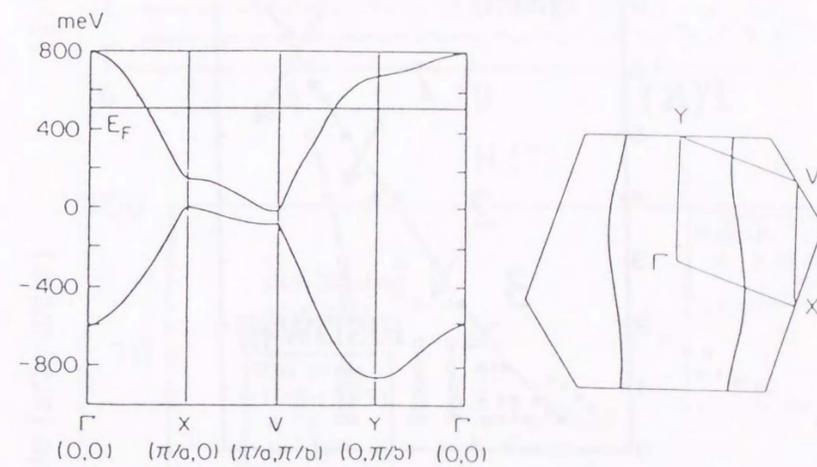


図 5.2. 拡張 Hückel 法から計算された $(\text{TMTSF})_2\text{X}$, $\text{X}=\text{AsF}_6$ のエネルギーバンド構造⁴⁸⁾.

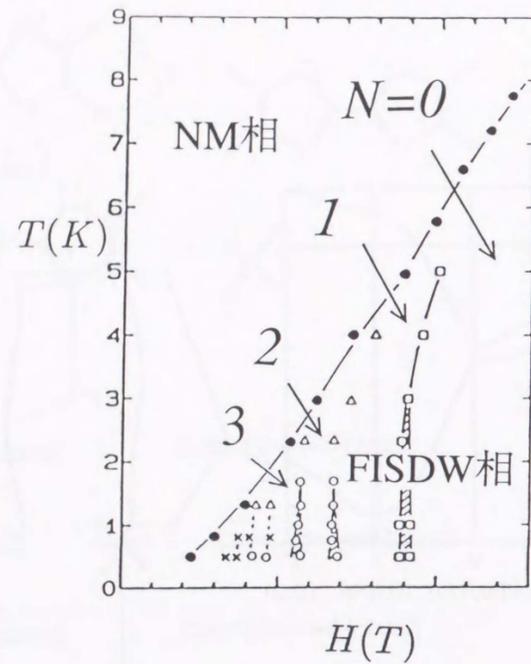


図 5.3. FISDW 現象の例として、圧力下での $X=PF_6$ の温度-磁場相図⁴⁹⁾. ●で仕切られた境界線より低温、強磁場領域 (高温、弱磁場領域) が FISDW 相 (NM 相) である. その境界線は二次転移線である. FISDW 相内が N の異なる各 SDW 相に分けられている. その境界は □ や △ や ○ であり, その境界線は一次転移線である.

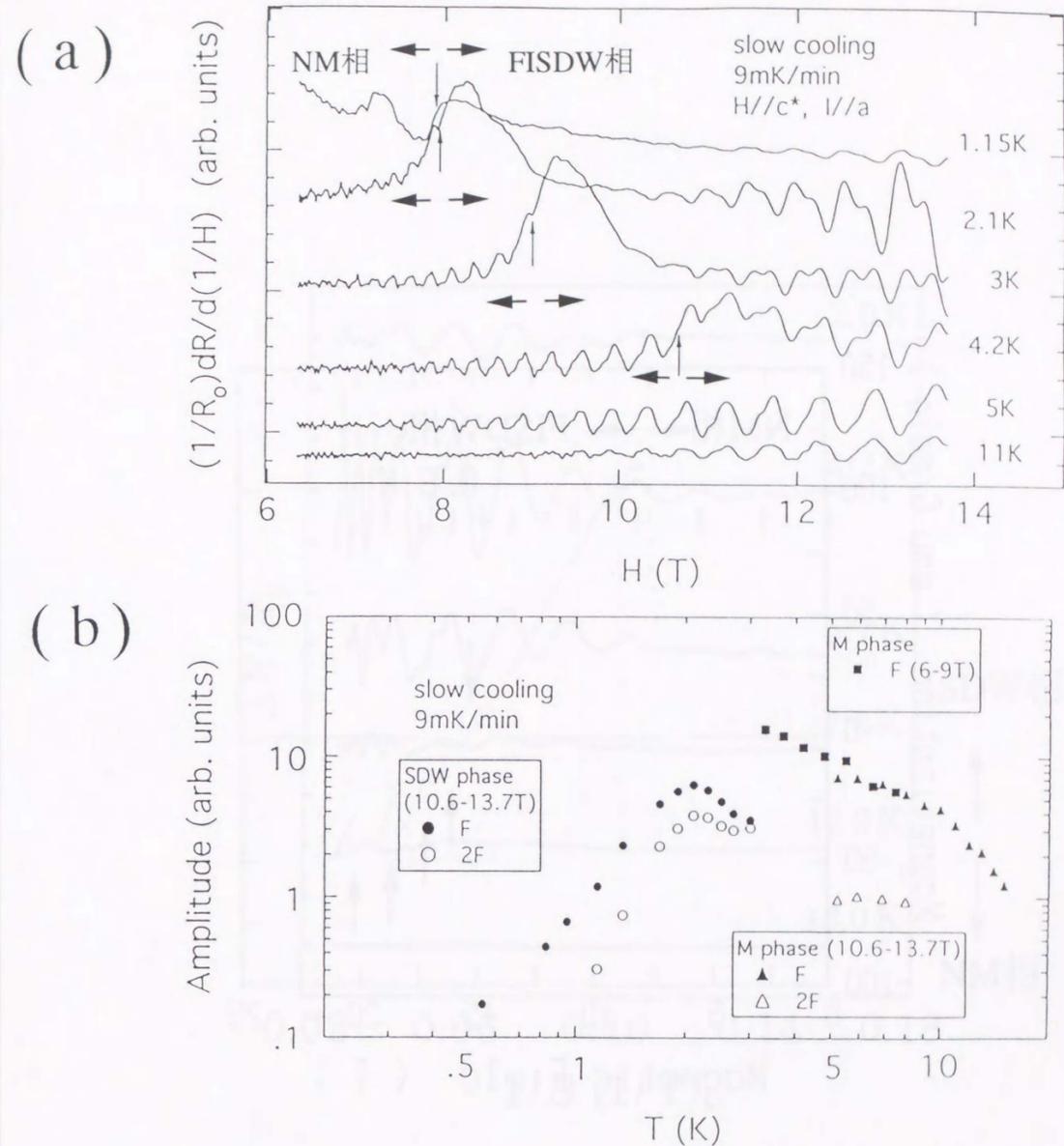


図 5.4. (a) $X=ClO_4$ の伝導面に垂直磁場を印加した場合の磁気抵抗の観測結果⁵⁹⁾. 磁場の強さの逆数に関して SdH 振動的に振動している. 矢印が NM 相と FISDW 相の境界を示す. 5K 以上では全磁場領域で NM 相である. (b) 二種類の磁場の領域 (NM 相と FISDW 相) の RO の FTA の温度変化⁵⁹⁾. ■ と ▲ が (△) NM 相での RO の FTA (RO の第 2 高調波成分の FTA) であり, ● (○) が FISDW 相での RO の FTA (RO の第 2 高調波成分の FTA).

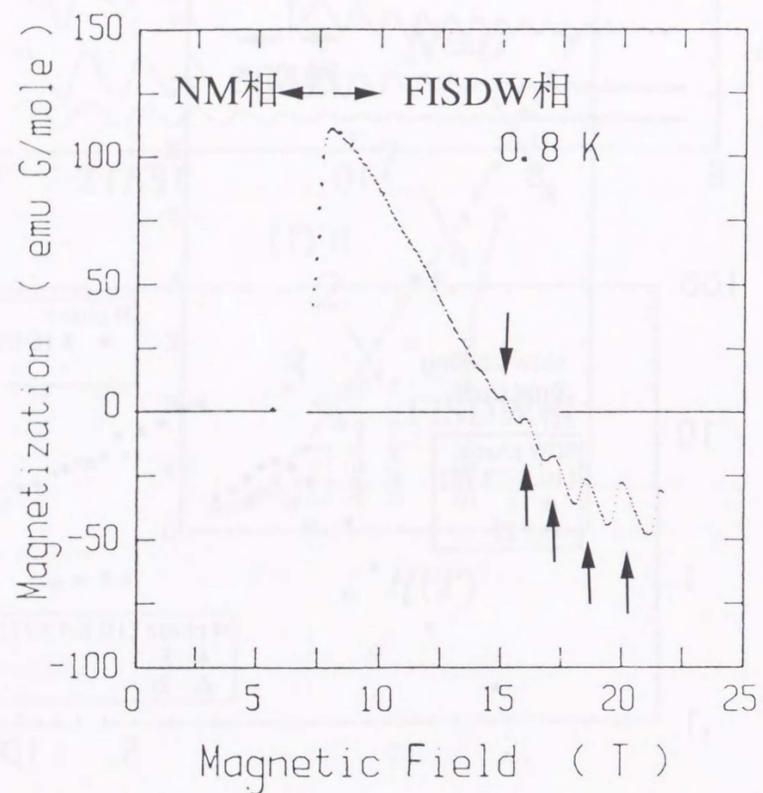


図 5.5. $X=\text{ClO}_4$ の伝導面に垂直磁場を印加した場合における磁化⁵⁵⁾. FISDW 相において RO が見えている (矢印で示す). しかしながら, NM 相では詳しく結果が示されていない.

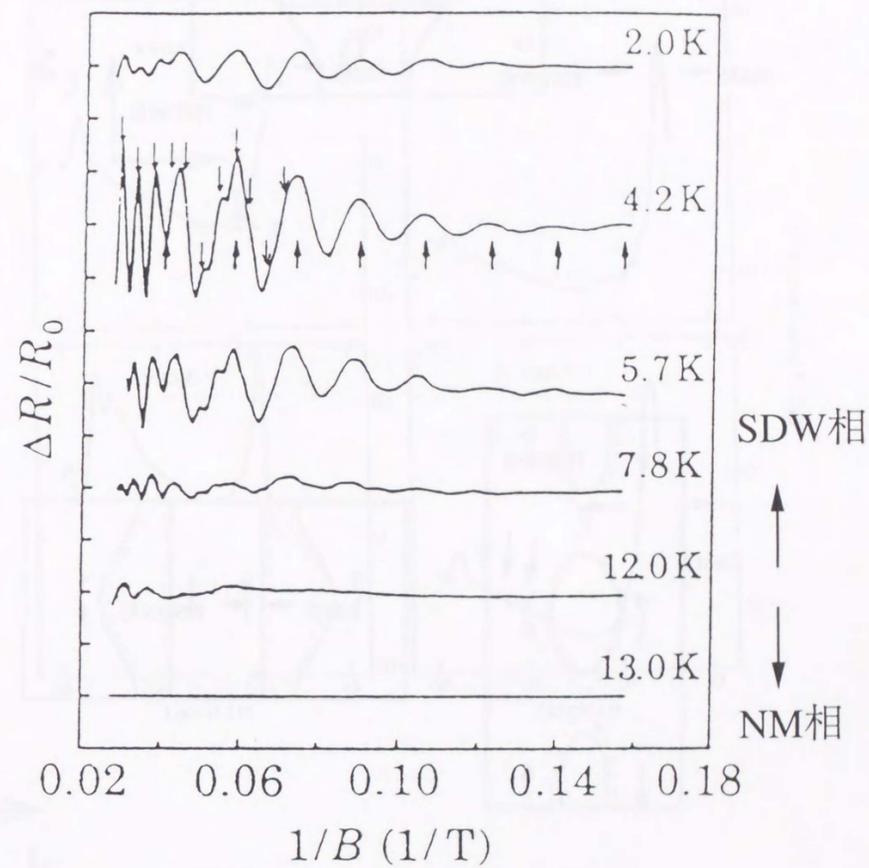


図 5.6. 常圧下の $X=\text{NO}_3$ (SDW 相) の伝導面に, 垂直磁場を印加した場合の磁気抵抗の観測結果⁶⁰⁾. 横軸は磁場の強さの逆数であり, 様々な温度についての結果が示してある. 矢印からわかるように, 短周期の振動 (RO) と長周期の振動 (LO) が存在していることがわかる. また, 短周期の f_{RO} と長周期の f_{LO} が MB によって結び付けられていることがわかる.

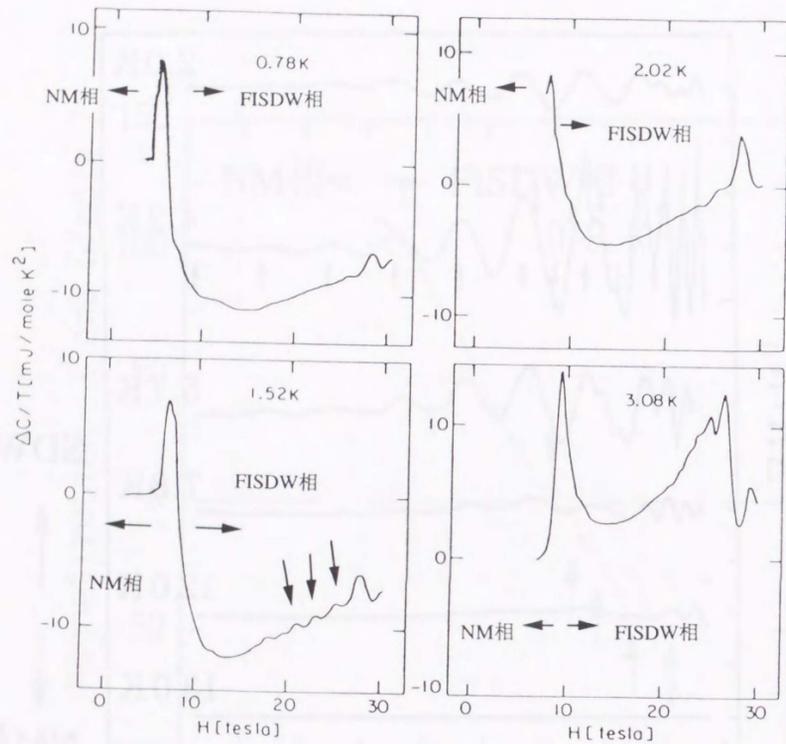


図 5.7. $X=\text{ClO}_4$ の伝導面に垂直磁場を印加した場合の比熱の観測結果⁵⁸⁾. 4つの温度に関する結果が示してあり, 1.52K のとき RO が最も顕著に見えている (矢印で示す). 約 7T と約 27T で比熱の飛びがわかる. これは NM 相から FISDW 相への二次転移現象である.

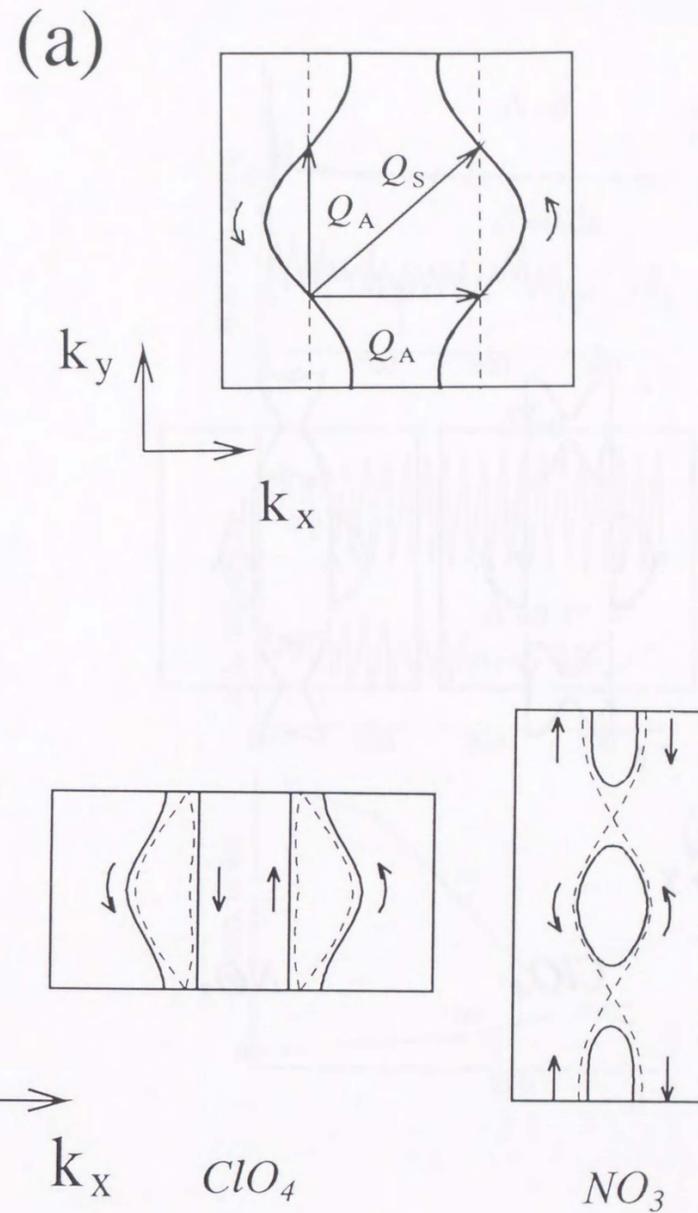


図 5.8. (a) 我々の計算による $(\text{TMTSF})_2X$ のフェルミ面 ($t_b/t_a = 0.6, t_b'/t_a = 0.2$). 図中の $Q_A = (0, \pi/b)$ ($Q_A = (\pi/a, 0)$) は ClO_4 (NO_3) についての AO の周期. Q_S は $(\pi/a, \pi/b)$ である. (b) (a) に各 AO ポテンシャルを導入した後のフェルミ面. AO ポテンシャルの大きさ V/t_a は 0.2 である. 左側が ClO_4 , 右側が NO_3 である. 磁場中の電子の進行方向を矢印で記してある. 実線の四角で囲んでいるものが BZ である.

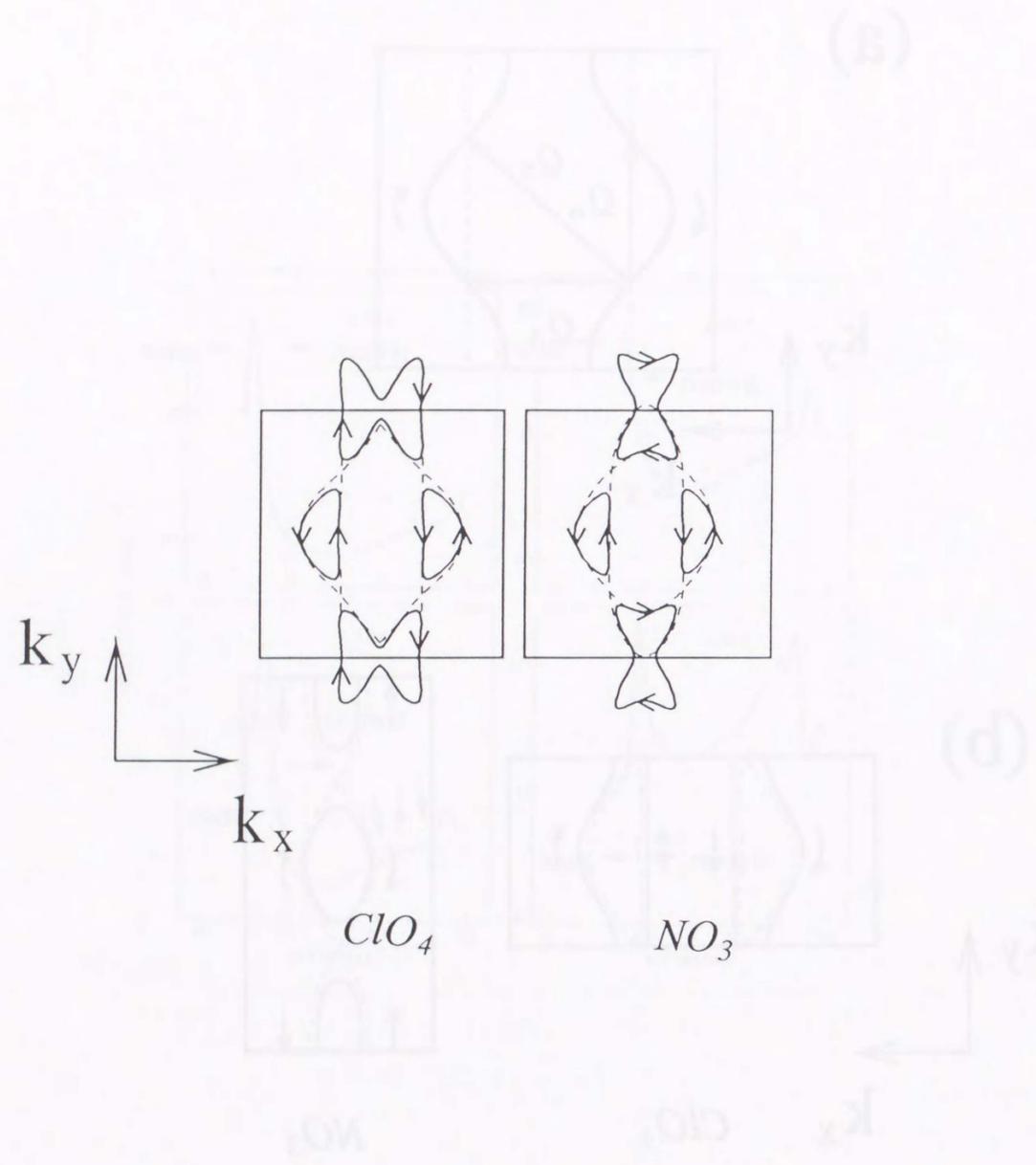


図 5.8(c). (c) (a) に各 AO ポテンシャルと SDW ネスティングを行った後のフェルミ面. 左側が ClO_4 , 右側が NO_3 である. SDW ギャップの大きさ Δ/t_a は 0.03 である. 破線は MB により運動できる軌道であり, この軌道が RO の起源となる. ClO_4 も NO_3 も, 電子的な運動をする軌道とホール的な運動をする軌道の 2 種類あることがわかる. また, 実線で示されている小閉軌道が LO の起源である. 磁場中の電子の進行方向を矢印で記してある. 実線の四角が BZ.

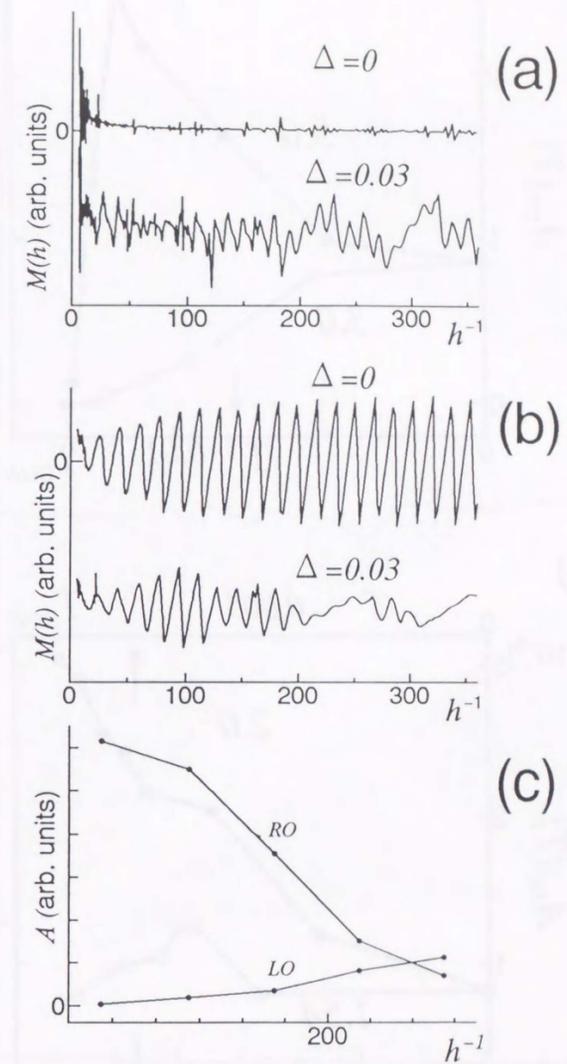


図 5.9. (a) と (b) は我々の計算結果 $M(h^{-1})$. (a) が ClO_4 , (b) が NO_3 に対する結果である. それぞれ, 上図が NM 状態 ($\Delta = 0$), 下図が SDW 状態 ($\Delta = 0.03$) に対応する. (c) は (b) の SDW 状態 ($\Delta = 0.03$) に関する FTA の A_{RO} と A_{LO} の磁場依存.

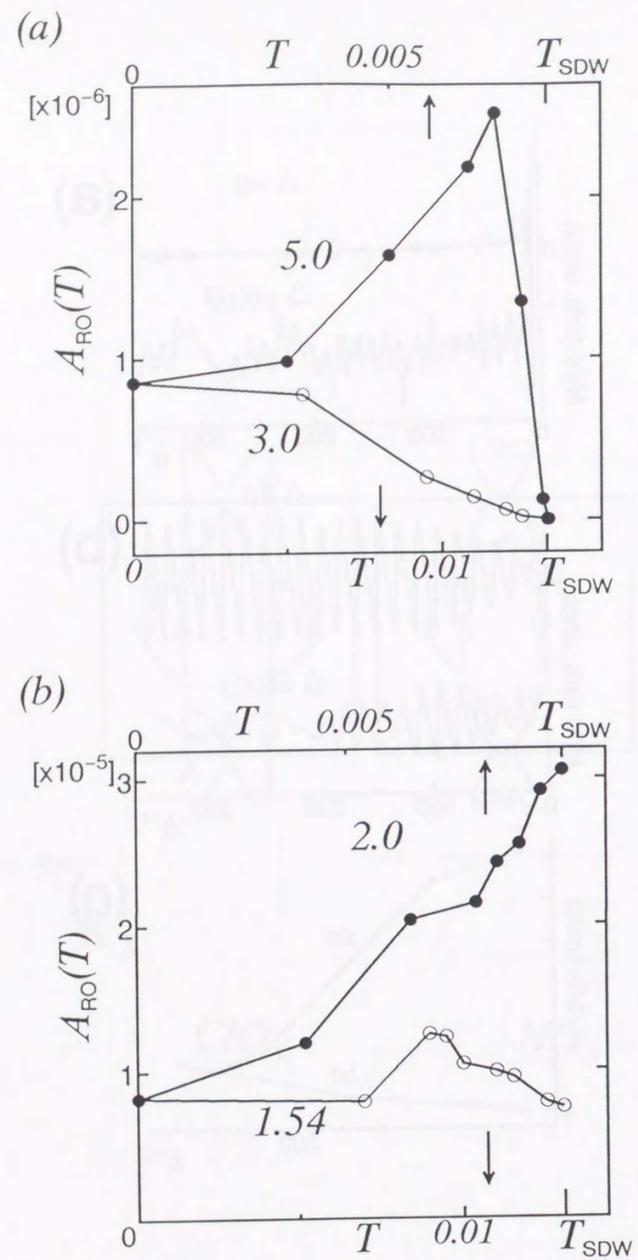


図 5.10. RO の FTA の温度依存. (a) ClO_4 , (b) NO_3 である. それぞれ Fourier 変換領域は (a) では $86 \leq h^{-1} \leq 150$ (b) では $60 \leq h^{-1} \leq 140$ である. 両方の図において, T_{SDW} 付近で FTA の急激な変化がある.

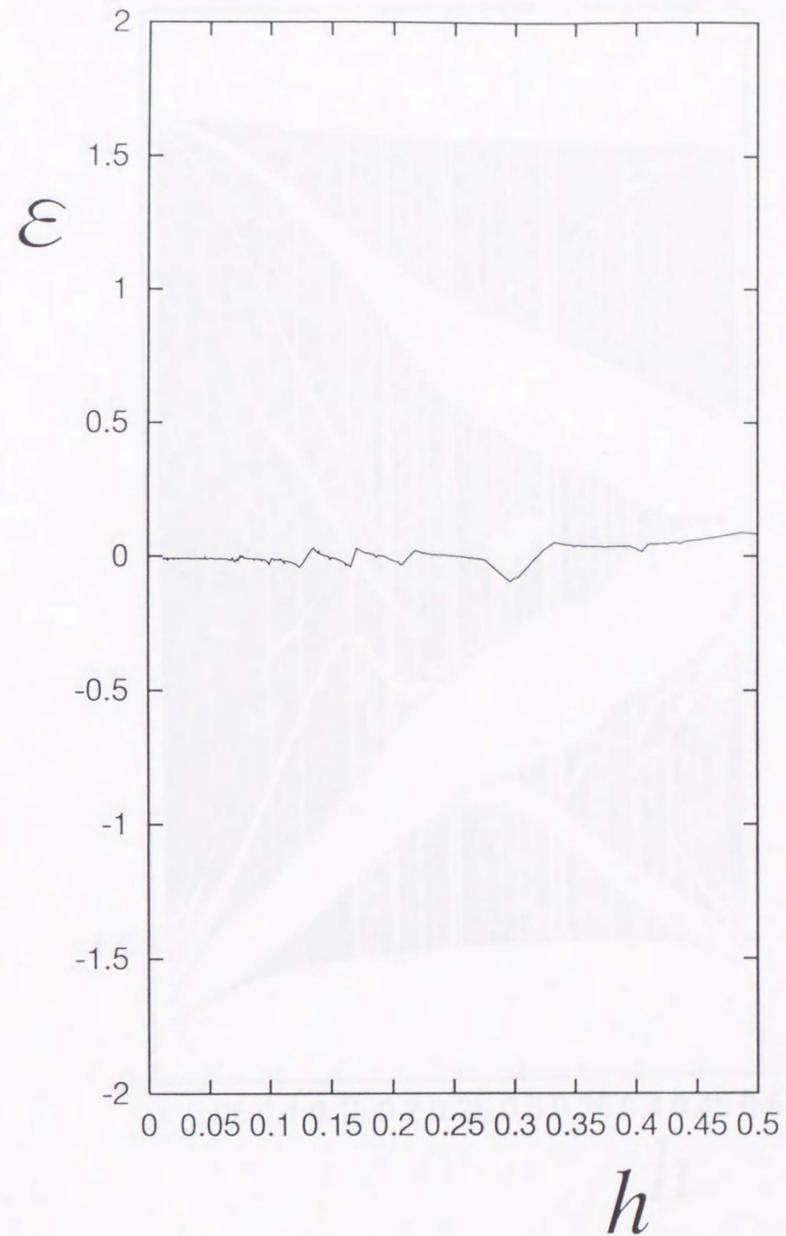


図 5.11(a). 磁場中のエネルギーバンド構造に対するフィリング 1/2 のときのフェルミエネルギー. $t_b/t_a = 0.6, t_b'/t_a = 0.1, V/t_a = 0.4$ である. エネルギーバンドは ClO_4 の NM 状態 ($\Delta = 0$) に対応する.

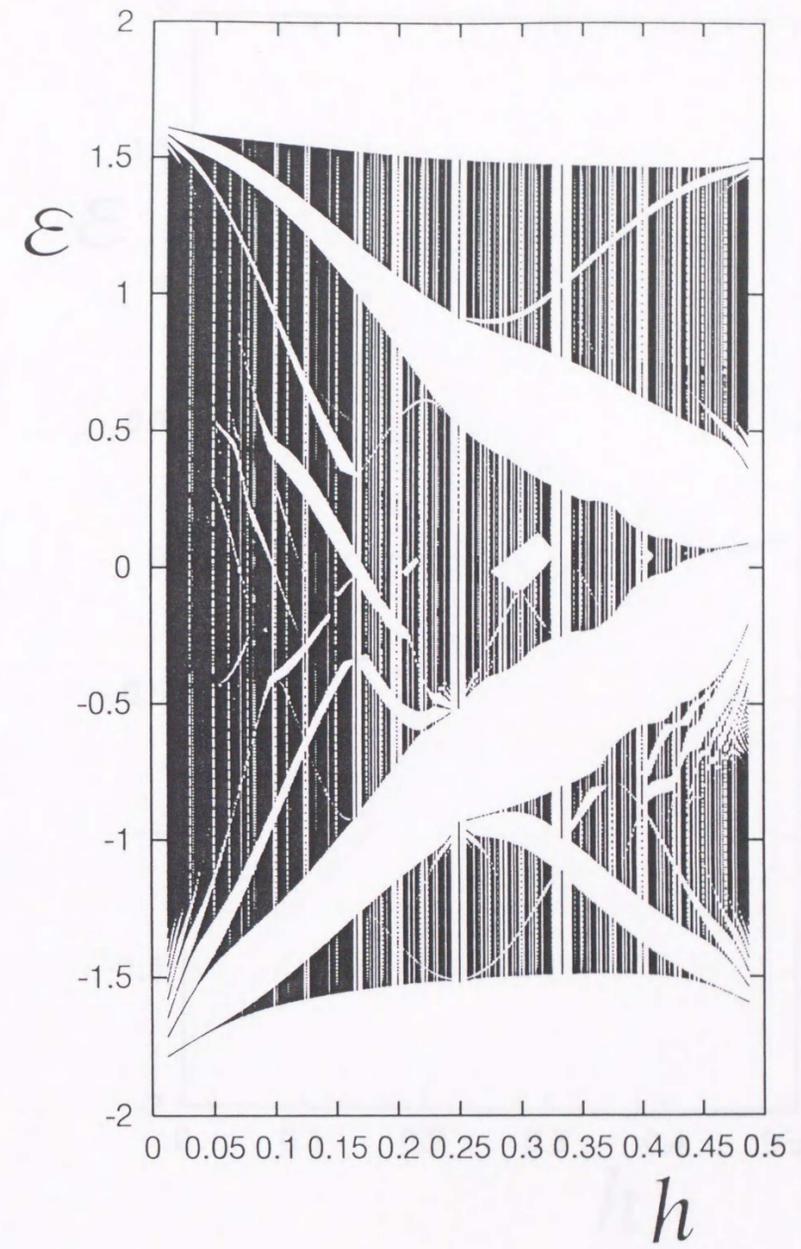
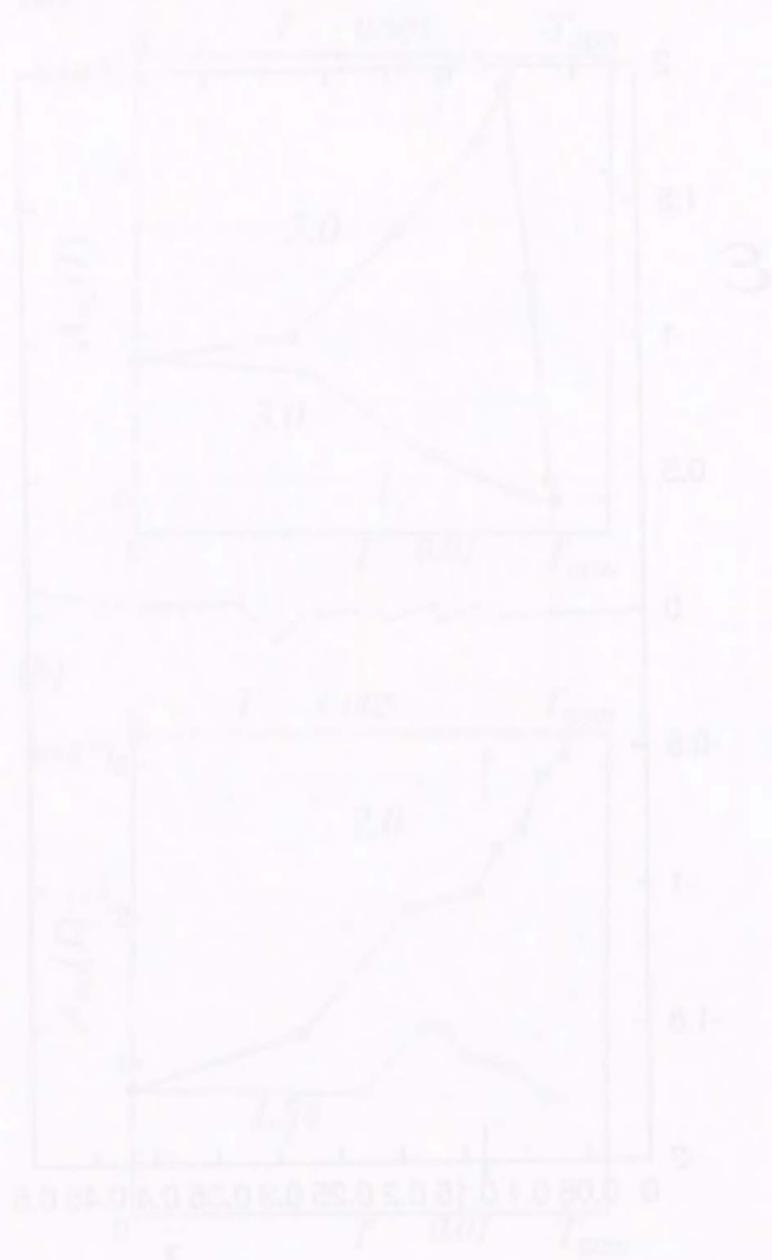


図 5.11(a). 磁場中のエネルギーバンド構造. $t_b/t_a = 0.6, t_v/t_a = 0.1, V/t_a = 0.4$ である. ClO_4 の NM 状態 ($\Delta = 0$) に対応する.

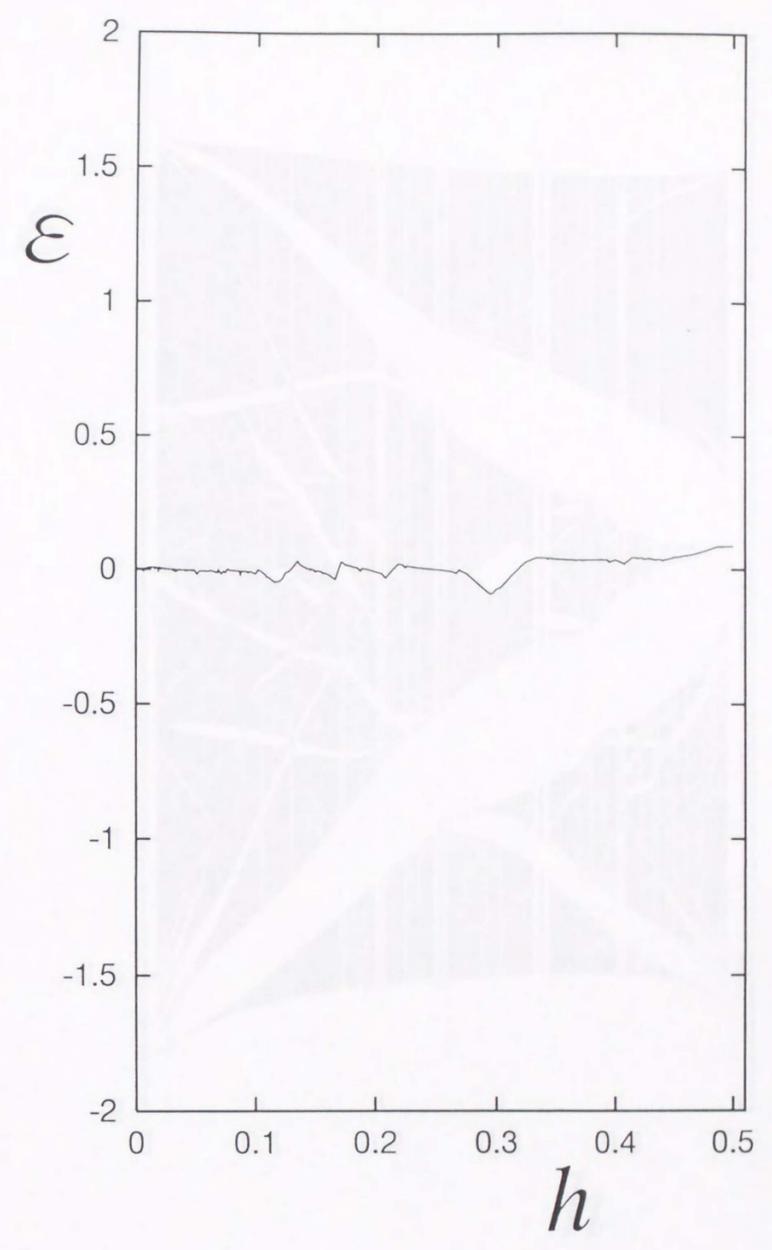


図 5.11(b). 磁場中のエネルギーバンド構造に対するフィリング 1/2 のときのフェルミエネルギー. $t_b/t_a = 0.6, t_b'/t_a = 0.1, V/t_a = 0.4$ である. エネルギーバンドは ClO_4 の SDW 状態 ($\Delta = 0.03$) に対応する.

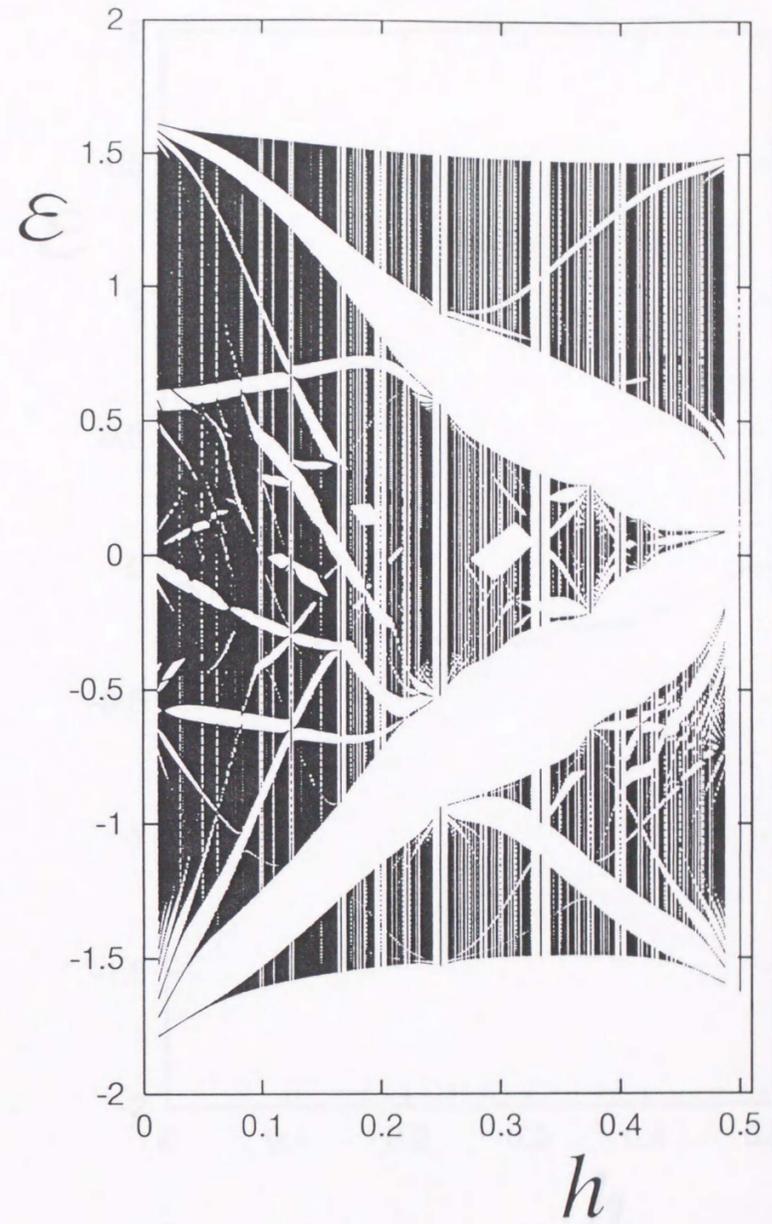


図 5.11(b). 磁場中のエネルギーバンド構造. $t_b/t_a = 0.6, t_b'/t_a = 0.1, V/t_a = 0.4$ である. ClO_4 の SDW 状態 ($\Delta = 0.03$) に対応する.

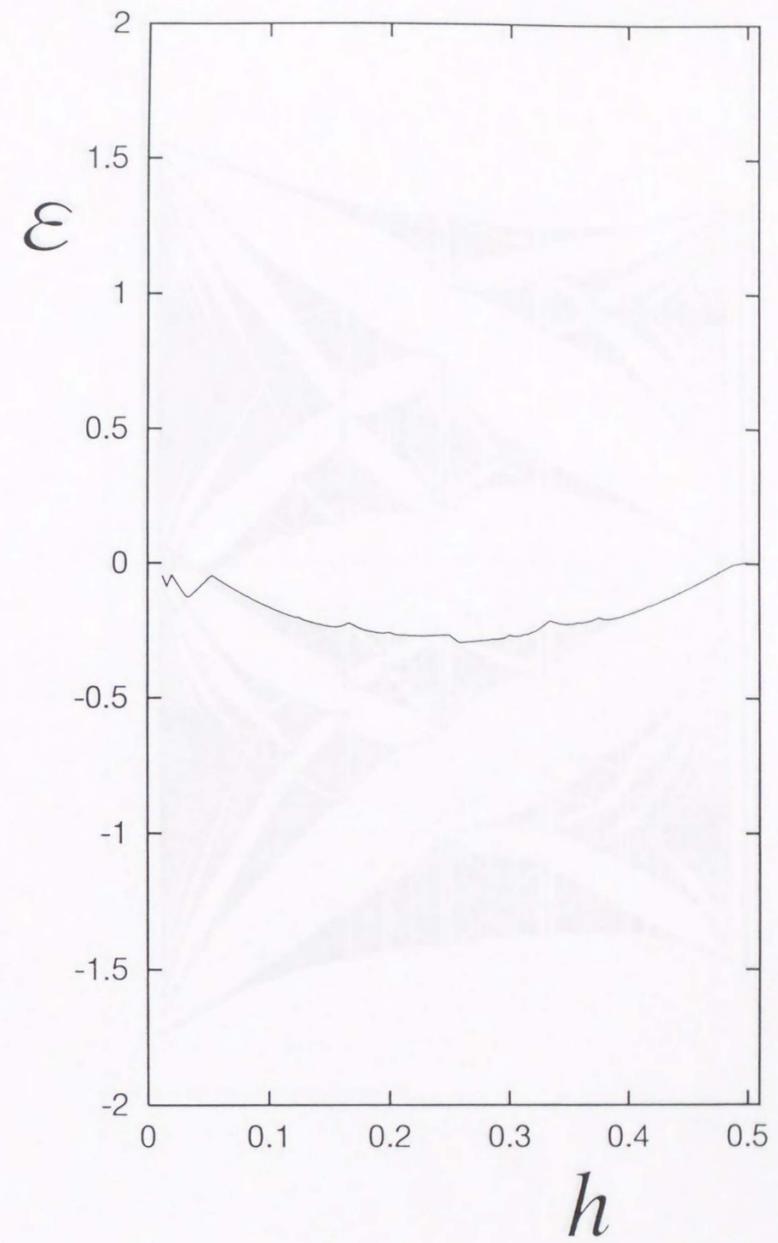


図 5.11(c). 磁場中のエネルギーバンド構造に対するフィリング 1/2 のときのフェルミエネルギー. $t_b/t_a = 0.6, t_b'/t_a = 0.1, V/t_a = 0.4$ である. エネルギーバンドは NO_3 の NM 状態 ($\Delta = 0$) に対応する.

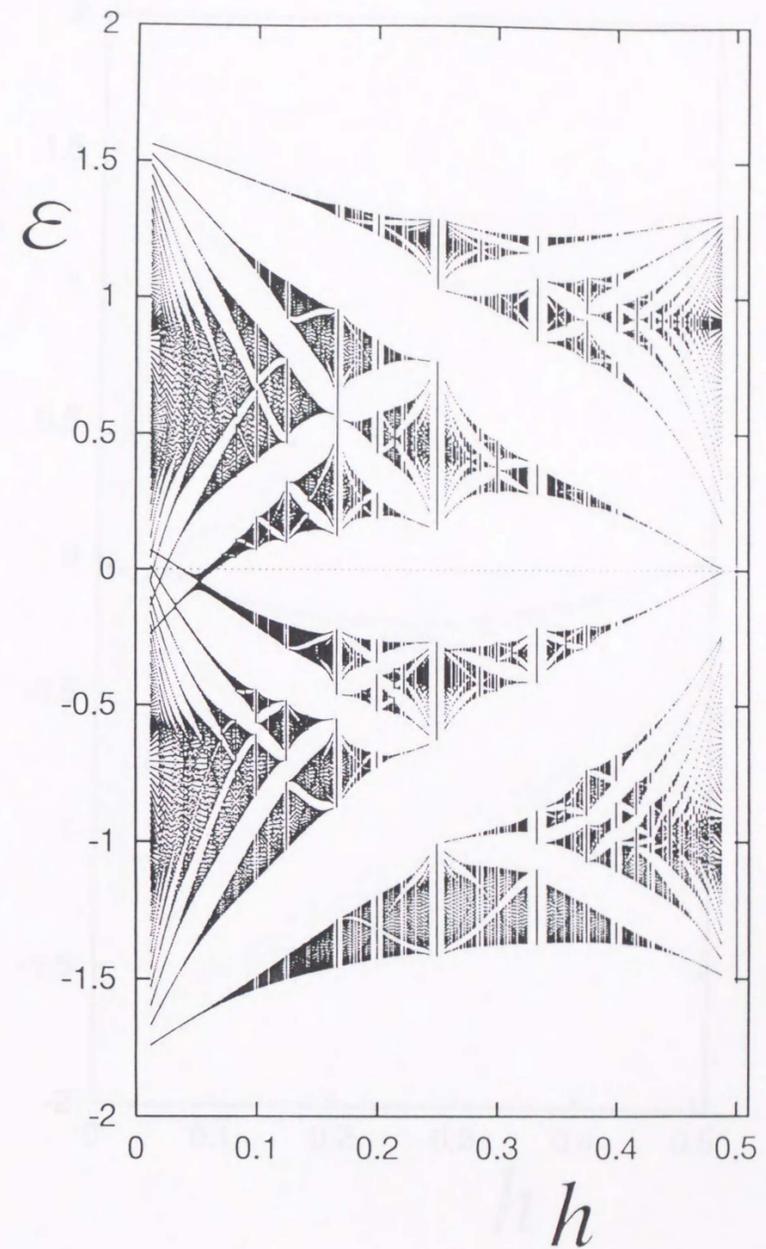
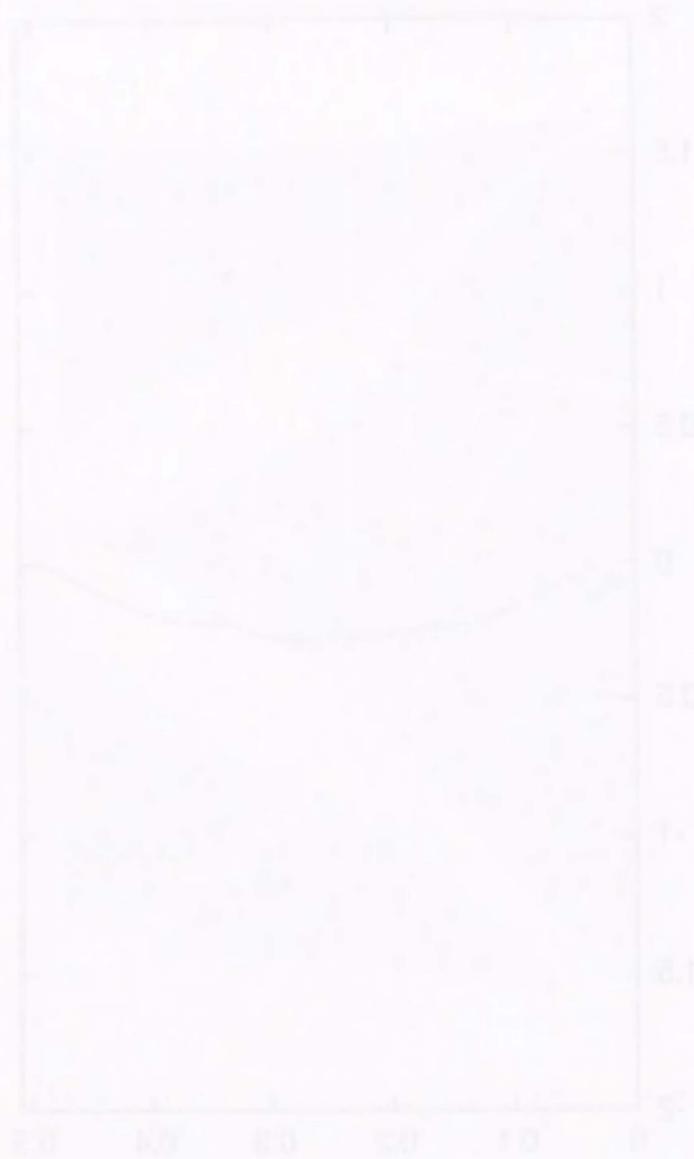


図 5.11(c). 磁場中のエネルギーバンド構造. $t_b/t_a = 0.6, t_v/t_a = 0.1, V/t_a = 0.4$ である. NO_3 の NM 状態 ($\Delta = 0$) に対応する.

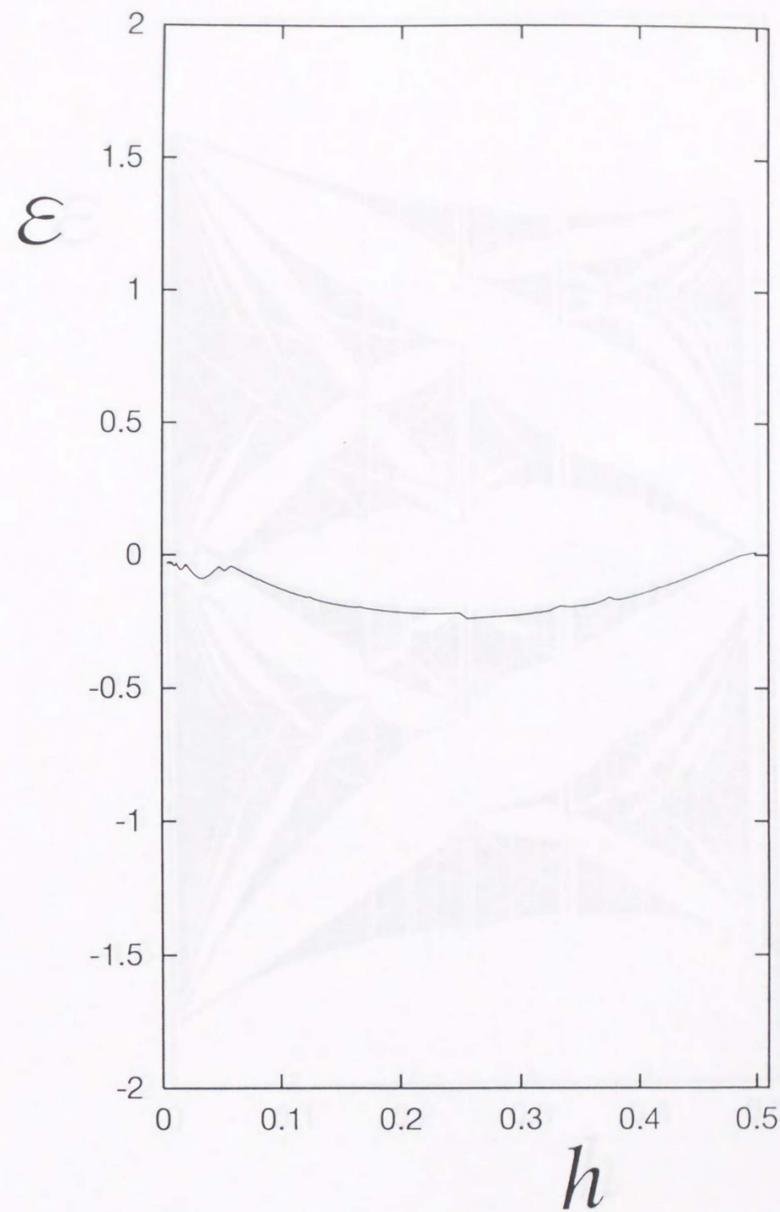


図 5.11(d). 磁場中のエネルギーバンド構造に対するフィリング 1/2 のときのフェルミエネルギー. $t_b/t_a = 0.6, t_y/t_a = 0.1, V/t_a = 0.4$ である. エネルギーバンドは NO_3 の SDW 状態 ($\Delta = 0.03$) に対応する.

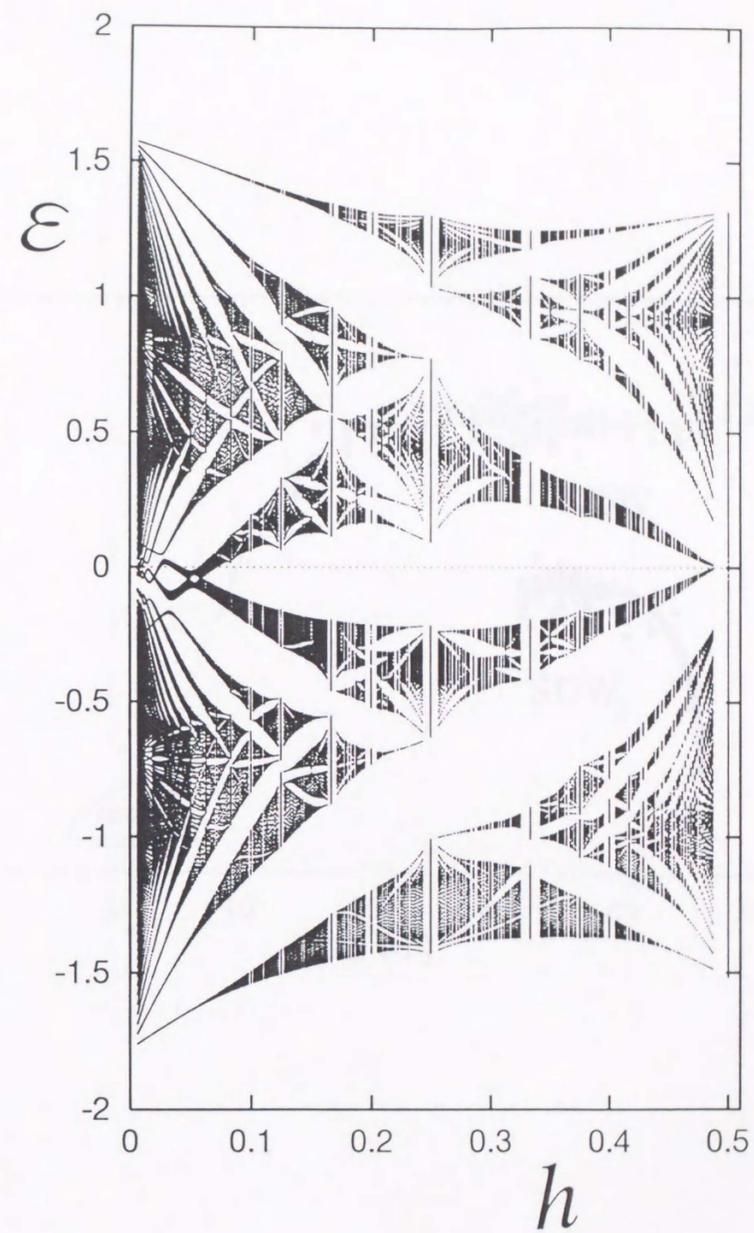


図 5.11(d). 磁場中のエネルギーバンド構造. $t_b/t_a = 0.6, t_y/t_a = 0.1, V/t_a = 0.4$ である.
 NO_3 の SDW 状態 ($\Delta = 0.03$) に対応する.

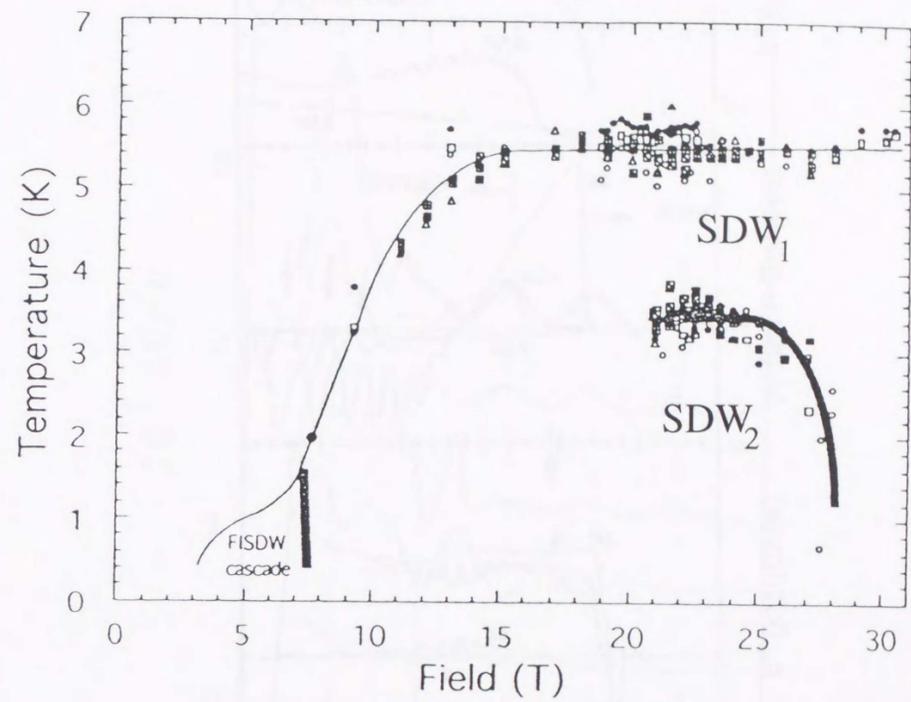


図 5.12. $X=\text{ClO}_4$ に対する磁化や磁気抵抗やホール抵抗の測定結果から構築された温度-磁場相図⁷¹⁾. 上側の細い実線が二次転移の境界であり, 太い実線が一次転移の境界である.

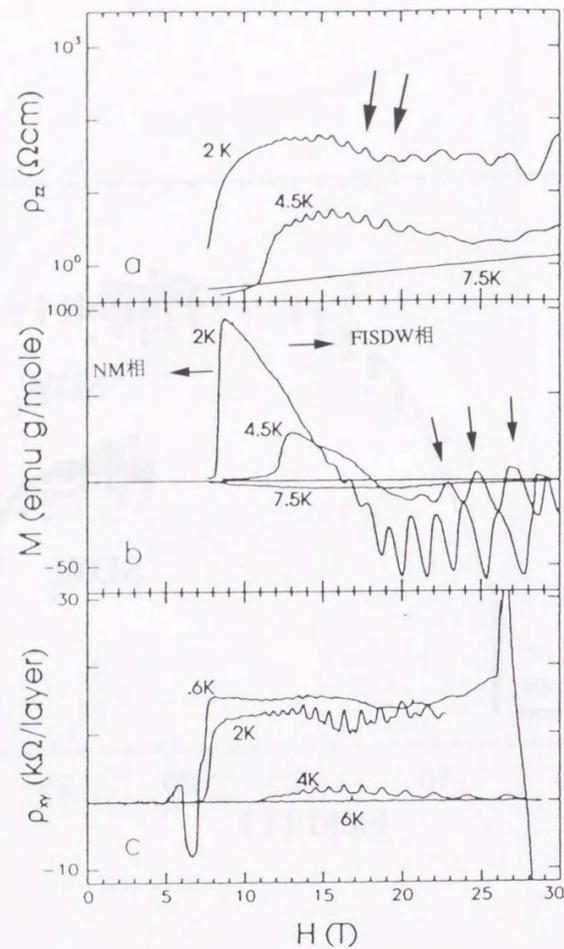


図 5.13. $X=\text{ClO}_4$ に対する幾つかの温度における磁気抵抗 (上段), 磁化 (中段), ホール抵抗 (下段) ⁷¹⁾. 磁化について, 2K と 4.5K において RO が約 15T 以上から観測されている (矢印で示してある). 分かりにくいですが, 両者の鋸歯的波形が逆転していることに注意して欲しい. 縦磁気抵抗 (ρ_{zz}) にも, 2K と 4K において約 15T 以上から, 周期的な振動である RO の存在がわかる (矢印で示してある).

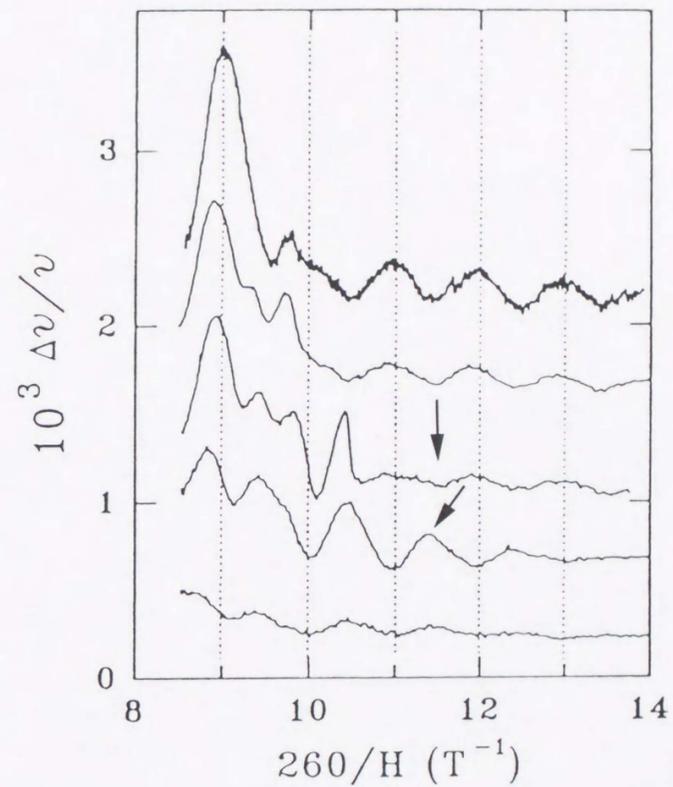


図 5.14. $X=\text{ClO}_4$ に対する幾つかの温度における音波の測定結果 ⁵⁶⁾. 温度は上から順に 0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 5K である. 3.5K と 2.5K を境として, 位相が丁度半波長ずれていることがわかる. 矢印に注目して欲しい. 波形の山と谷が逆転していることがわかる. 横軸は磁場の強さの逆数である.