受賞記念解説 —— 高圧力学会賞 ——

複合極限下における物性測定装置開発と それを用いた特異な電子状態を持つ 物質の電子物性の研究

High-Pressure Apparatus at Multi-Extreme Conditions and Its Application
for the Research of Condensed Matters with Novel Electronic States

巨海 玄道

OOMI Gendo

A versatile high-pressure apparatus has been constructed to measure the electronic, magnetic and thermal properties of metals, alloys and compounds at low temperature and high magnetic field. A pressure-induced crossover from heavy fermion to intermediate valence state and pressure-induced superconductivity are reported for some intermetallic compounds including f electrons. The effect of pressure on the giant magnetoresistance (GMR) for nanoscale magnetic materials is described. The enhancement of GMR is found at high pressure. The Compton scattering at high pressure is also reported as an interesting topic.

[*Multiextreme conditions, pressure-induced crossover, superconductivity, nanoscale magnet, Compton scattering*]

1. はじめに

自然科学の研究を行う時、通常、我々は自分の得意分野をキーワードとして研究を進めていく。私の場合、強いて挙げれば「高圧力」と「電子物性」などが出てくる。“強いて挙げれば”と言う意味は、その2つの分野で私は必ずしもエキスパートとは言えないということである。ただ、私を取り巻いてきた（有能なエキスパートと言える）人とそれなりの研究環境に恵まれて本人の能力の低さにも拘らず、ある程度の成果を出すことができたということが本当の所である。私はこれまでいくつかの大学に所属し、そこで研究室を開設して研究を続けてきたが、そのテーマは「高圧力下の電子物性研究」であったことは一貫している。私の高圧研究の出発点は広島大学における高圧力下のX線回折の実験であった。その時、回りで静水圧を用いた高圧力下の磁性の研究を行っている人がいたが、なんで高圧を出すのに

液体が必要なのか素朴な疑問を抱いた。当時の私の高圧物性への理解はその程度のものであった。今思い返すと何とも赤面の至りである。博士課程を北海道大学ですごし、助手時代を含めて約13年の間、低温・高圧の物性実験に本格的に取り組んだ[1]。ここで私は圧力発生技術の初歩から試料づくり、電気・磁気測定など幅広い高圧物性実験技術を身に付けることとなった。

研究を進める過程で大学は1990年代の大学設置基準の大綱化に始まり多くの変革があり、私が研究室を持つようになったのは、以下で述べるように丁度そのころであったため、その荒波をかぶりながら研究を継続しなければならなかった。そして、そこでも私は高圧又は極限と言うことをキーワードにして物事（研究及び研究体制）を進めていくことになった。そこではいかに研究を続けるべきか、どんな体制で研究をつづけた方がよいかなど多くの課題に直面した。本稿では、そのような中で研究をいかに

続けてきたか、またそれを支える体制の構築について私の経験を紹介し、これから活躍される多くの人たちの何かの参考になればと思う。

2. 複数極端（複合極限）条件（低温・高圧・高磁場）下における物性測定装置の開発

1987年の夏の終わりに熊本大学教養部へ異動した。当時は学生もいなく、私の部屋があった4階建ての教養部A棟は午後7時を過ぎると宿直の人を除いては誰もいなくなり、着任後しばらくは薄暗い部屋で天井を見ながらボーッと過ごした。しかし、そういう毎日ばかりでは建設的でないと思い、予算はなかったが北大時代から暖めてきたアイデアを実現しようと考え、高圧装置開発に着手した。講義・学生実験を終えた午後7時ごろから上で述べたような静寂な理想的な環境の下で紙と鉛筆と定規・コンパス等を用いて装置の設計に取り掛かった。夜も更けて帰るころになるとA棟に居るのは自分だけという日も多かった。幸いなことに、その後、助手や大学院生が研究室に入ってきて装置開発は飛躍的に進むこととなった。

高圧装置の設計は目標とする温度や圧力によって、あるいは対象物質や測定する物理量によって、異なってくる。本装置は高圧力下で精密物性測定とその効率化を目指して開発された。これまでの低温・高圧装置は手軽さと言う観点からクランプ型が主であった。本装置はこれらの装置と違って、圧力・磁場を広い温度範囲で自由に变化できるものであった (Fig. 1, [2,3])。ピストン・シリンダー装置を念頭に置いたため、試料空間の容量が大きく、電気測定ばかりでなく磁気測定や熱膨張測定等にも適用でき幅広い用途を持っていた。また、3条件を同時に变化させるため実験の効率やデータの質がよくなることも判明した。特徴の一つに超伝導マグネットを使用した磁場が入っているため、例えば磁気抵抗や磁歪の測定が容易に行えた。このため体積変化を伴う相転移の検出や巨大磁気抵抗効果などは格好のテーマとなった。

この装置が動くまでは多くのトラブルを経験したが、当時のスタッフや院生たちの努力でやっと使えるようになった。その後、国内の何か所かでこの装置と類似の装置が作られた。さらに改良を加え、九州大学に移ってから2号機を作製した。本装置の構造は単純であり、Swenson型の装置に単に超伝導

Fig. 1. Cross section of the present versatile high-pressure apparatus for the measurement at high magnetic field and low temperature (a) and the bottom part in the extended scale (b).

マグネットを加えたものである。細かい点を含めていろいろと改良を重ねたが、詳細は原著論文[2,3]を見られたい。

3. 強相関係物質における高圧力下の電子状態の研究

圧力下の実験を計画するとき、一つの視点として「その物質の物理量が高圧力下で大きな変化をするだろうか」という期待がある。圧力をかけてもびくともしない物質は世の中に多い。他方、圧力をかけて常圧下では予想もできなかった新しい性質が出てくると我々は血沸き肉躍る経験をする。また、それを通して研究に新しい切り口が見つかり、当該分野にブレイクスルーをもたらすことはよくあることである。前者は後者に比べて“押しがい”のない物質と言われるときがある。しかし物理量を測定して小さな変化であるけれどもそれが重要な場合もある。例えば鉄の自発磁化の圧力効果などはその例であろう。バンド計算等の理論的結果と直接比較できるので、1960年ごろの測定値がいまだに用いられている[4]。ブリッジマンなどをはじめ、圧力下の測定を始めたころの十分な装置もないうちに、50~60年たった今でも使われるようなデータを出した先輩たちの深い洞察と高い技術力を知るとき、その根底に流れる学問の深さを痛感するのは筆者だけであろうか。

このようなことを考えるとき、高圧力下の研究スタイルに大きく分けて2つの行き方があることがわかる。一つは、高い圧力をめざしなおかつその時代の最先端の典型的物質の物性を追うという行き方と、もう一つは、地味ではあるが圧力は低いものの学問的に重要な物理量を追うという行き方であろう。どちらを取るかはその人の学問観や立場などによるが、実際はこの2つの間と言う人が大半ではなかろうか。筆者はカナダに留学したが、そこではどちらかと言うと後者の立場の人が多かったような気がする。帰国してからも九州にいたからではないが、研究スタイルはやや後者のそれとなってしまった。“押しがい”のある物質としては固体電子論の立場から出てくるものの一つに「極限的な電子状態」—いわゆる、“*marginal electronic state*”—にある物質と言うのが一つの解ではなかろうか。これらの物質の特徴は、磁場、温度や圧力などの広い意味の外力の作用を極端に変化させた（極限環境）もとでそれらの電子状態が大きく変化すると言うことが共通項として出てくる。以下では、そのような研究例を挙げていくことにする。

3.1 Ceを含む重い電子系物質の電子状態の圧力誘起クロスオーバー

重い電子系物質とは、伝導電子の有効質量が通常金属のそれより2桁から3桁大きい物質群の総称である[5]。大変狭いバンドを形成し、不安定な電子状態を持つため、圧力などの外部変数の作用で重い電子状態は容易に壊れ、その結果として物理量が大きな圧力変化をすることで知られている[6,7]。本研究で開発された装置を使って、例えばCeInCu₂[8]やCePtSi₂[9]等の112系、CeRh₂Si₂[10]に代表される122系などの物質で重い電子状態にある物質を中心として高圧力下の電気抵抗、熱膨張率、磁気抵抗及び磁歪等、またX線回折を用いた諸測定を行うことにより、これらの物質の高圧力下における電子状態について系統的な実験を行ってきた。これらの物質に共通する振る舞いは、“高圧力下で重い電子状態が崩壊し、混合原子価状態に移っていく”という電子状態のクロスオーバーが観測されることであった[6,7]。

例として典型的な重い電子系物質であるCeAl₃（電子比熱係数 $\gamma \sim 1.5 \text{ J/mol} \cdot \text{K}^2$ ）の電気抵抗の温度変化 $\rho(T)$ を示した（Fig. 2, [11]）。1気圧では重い電子系物質の特徴である35 K（ $=T_{\text{max}}$ ）近傍に

Fig. 2. Temperature dependent electrical resistivity $\rho(T)$ of the heavy fermion substance CeAl₃ under high pressure. The $\rho(T)$ of LaAl₃ is also shown for comparison.

Fig. 3. The coefficient A of T^2 -term at low temperature as a function of pressure.

ピークを持つ構造を示す。それ以上の温度では電気抵抗は近藤効果により $\log T$ 依存を示す。この物質の $\rho(T)$ は低温で Fermi 液体特有の T^2 依存を示し、その係数 A は高圧力下で大きく減少する（Fig. 3）。電子状態の評価をするため、この系の特性温度である近藤温度 T_K のグルナイゼンパラメーター Γ を導入し、その体積（圧力）変化を調べた。 Γ は、

$$\Gamma = -\frac{\partial \ln T_K}{\partial \ln V} \quad (1)$$

と定義される。 T_K は A , T_{max} と以下の関係にある。

$$A \propto T_K^{-2}, \quad T_{\text{max}} \propto T_K \quad (2)$$

Γ の値は Fig. 2 や 3 の結果と体積の圧力変化を使って求められた[11]。その結果、1 気圧では $\Gamma=97$ と大きな値であった（通常金属では Γ は大体 1~10 程度である）が圧力下で減少し、高圧力下ではいわゆる混合原子価物質と同程度の値（ $\Gamma \sim 10$ ）になることを明らかにした。この結果から有効質量も高圧力下では大きく減少することになり、重い電子状態が圧力下で崩壊することがわかった。この問題は所謂量子相転移と深く関連している。即ち、もともと CeAl_3 は 1 気圧で量子臨界点直上にあり、*marginal electronic state* となっているが圧力をかけると臨界点から離れ、通常金属と同じ電子状態になることを示している。このような現象は他の重い電子系物質 CeInCu_2 や CeCu_6 等にも同じようにみられている[12]。

3.2 f 電子系物質における圧力誘起超伝導

前節の重い電子系物質における電子状態の圧力誘起クロスオーバーは、定性的には近藤温度のグルナイゼン係数の圧力変化を用いて説明された。しかし、このような電子転移の研究をもっと進めて例えば、磁気秩序がなくなってから新しく誘起される電子状態として超伝導がクローズアップされ、現在も盛んに研究がおこなわれている。詳しくは文献 6, 7 を見ていただきたい。ここでは、我々が関与した 2 つの物質について紹介する。

3.2.1 UGe_2

興味ある例として $5f$ 電子化合物 UGe_2 を挙げる。この物質は強磁性であり、磁気転移点 T_M （以下で出てくる超伝導転移点が T_c で表されるため、混同を避けるためこの記号を使う）は 50 K である。残留抵抗比が 600 程度（あるいはそれ以上）と驚異的な値を示す。単結晶試料の b 軸方向の熱膨張は温度の関数として特異な振る舞いをする（Fig. 4, [13]）。 b 軸の長さは、1 気圧では T_M 以下で膨張し、典型的な磁気体積効果を示す。また T_M 以下で b 軸は 25 K（ $=T^*$ ）近傍で小さな異常を示す。 T_M は圧力をかけると大きく減少し、大体 1.8 GPa ぐらいで 0 となる[13,14]。 T^* もやはり高圧力下で 0 となる。ところが、電気抵抗の T^2 項の係数 A は 1.1 GPa 近傍で発散した（Fig. 5）。特性温度を $1/\sqrt{A}$ と定義して圧力の関数としてプロットすると Fig. 5 の内装図のようになり、特性温度が 0 となるのは 1.1 GPa 近傍となる。上で述べた $T_M=0$ とな

Fig. 4. Linear thermal expansion $\Delta l/l$ along b -axis of single crystalline UGe_2 as a function of temperature at various pressure. The Curie temperature T_M at ambient pressure is shown by an arrow.

Fig. 5. The coefficient A of the T^2 term of single crystalline UGe_2 as a function of pressure. The solid and dashed curves are guides to the eye. The pressure dependence of $1/\sqrt{A}$ is shown in the inset.

る圧力 1.8 GPa より低いことになる。この奇妙な結果の解釈には大変悩んだが、電気抵抗が小さな異常を示す温度や上で述べた T^* がやはりこの圧力で 0 となることを考えると、“1 GPa 近傍で何らかの相転移がある”ことを示唆している[15]。結局、こ

Fig. 6. The $\rho(T)$ of CePtSi_2 at high pressure in the range $0 < P < 8$ GPa.

の転移の原因を考えているところに Cambridge の Saxena 達がこの圧力付近での超伝導を 0.8 K で発見した[16]。上で発見した奇妙な異常は、超伝導の前駆現象だったのである。当該分野の競争が国際的にいかに激しく行われていたかを示す典型的な例であろう。

3.2.2 CePtSi_2

上で述べたように、圧力誘起の磁気秩序消失や電子状態のクロスオーバーがあった時、それ以上の圧力で誘起される混合原子価や常磁性状態のほかにまれにはあるが超伝導が誘起される場合があることを述べた。次に $4f$ 電子系の例として CePtSi_2 を見てみよう。この物質は電子比熱係数が $0.6 \text{ J/mol} \cdot \text{K}^2$ の重い電子系に属する。 CePtSi_2 の電気抵抗の高圧力下における温度変化を測定すると、前節の CeAl_3 で見られたような重い電子系物質特有の $\rho(T)$ で山を持つような振る舞いが 1 気圧では見られるが、圧力を上げるにしたがって滑らかな曲線となり、8 GPa では混合原子価状態の物質によく似た $\rho(T)$ となる (Fig. 6) [9]。これは近藤温度が低い、重い電子状態が崩壊し、近藤温度の高い混合原子価状態へクロスオーバーしたことを示す。他方、高圧力下の比熱の測定から反強磁性秩序は 1 GPa 近傍で消失することがわかった[6]。この後、1 GPa 以上で 50 mK までの電子状態は中野らによって詳細に

Fig. 7. (a) The $\rho(T)$ of CePtSi_2 below 2.6 GPa in the logarithmic scale. The two temperatures showing the peak in $\rho(T)$, T_1 and T_2 are shown by arrows. The inset of (a) shows the details of $\rho(T)$ around superconducting transition temperature T_c at 1.7 GPa measured with a low excitation current. (b) The $\rho(T)$ of CePtSi_2 at high pressure below 1 K. The Néel temperatures T_N are shown by arrows in the inset of (b).

調べられた (Fig. 7, [17])。反強磁性転移温度が加圧とともに下がり、消失する圧力近傍 1.4 GPa 以上で Fig. 7b に見られるように超伝導が現れている。いくつかの特性温度 (抵抗がピークを持つ温度, T_1 , T_2 , T_{max} やネール温度 T_N) や残留抵抗値, 抵抗のべき n をプロットしてみると Fig. 8 のようになる。これらの系特有の複雑な電子相の中で超伝導が実現していることがわかる。興味深いのは Ce の価数が増える圧力 (Fig. 8b の P_v) 以上で超伝導が出現していることである。価数転移と超伝導がどのように関連しているのか興味ある問題であるが、その解決は今後の研究に委ねたい。

Fig. 8. (a) Phase diagram of CePtSi₂ under high pressure. The dashed line is the expected pressure dependence of T_N . The dash-dotted line is a linear extrapolation. (b) T_1 , T_2 and T_{max} as a function of pressure. (c) residual resistivity ρ_0 and the power n in the temperature dependence of ρ . The lines are guide to the eye.

4. ナノスケール磁性体における輸送現象の圧力効果

人工格子やナノグラニューラー系物質は磁性（スピン構造）と輸送現象とが密接に結びついた系である。この特異な電子構造に着目し、高圧力下の磁気抵抗を測定することにより、スピンの依存する電気抵抗、即ち Fe/Cr の巨大磁気抵抗（*Giant Magnetoresistance*: GMR）や Co-Al-O のトンネル型磁気抵抗（*Tunnel Magnetoresistance*: TMR）が圧力下でどのように振る舞うかを究明した。以下で、これらの成果を2つに分けて紹介する。

4.1 高圧力下における金属人工格子の GMR

Fe/Cr や Co/Cu 人工格子は強磁性の Fe 層と Co 層とが反平行に配列された層状構造を持つ GMR を示す典型的物質である[18]。これらの物質では反平行スピン配列が外部磁場に強く依存し、それによる電子散乱が大きく変化するため GMR が起きる。また、これらの物質の GMR の大きさは常磁性層の膜厚で振動し、1st peak, 2nd peak などと呼ばれている。ほとんどの人工格子の GMR は圧力下では減少する[19]。ところが、2nd peak の Fe/Cr の GMR を高圧力下で測定すると、2 GPa の加圧で常圧の2倍近くにも GMR は増大することがわかった[20]。1st peak に属する試料，[Fe (20 Å)/Cr (t_{Cr} = 10 Å)]₂₀，(Fe/Cr(10) と略) と 2nd peak に属する試料，[Fe (20 Å)/Cr (t_{Cr} = 30 Å)]₂₀ と (Fe/Cr(30) と略) の磁気抵抗 (MR) 効果の測定例を Fig. 9 の (a), (b) に示す。(a) では 2.5 GPa の圧力をかけても MR の値はそれほど変化しない。わずかに下がるだけである。他方，(b) では常圧の MR curve と比べて 2 GPa の加圧で MR は2倍以上に増加している。末永たちはその原因をスピン間のカップリングのクロスオーバーによるものと結論した[20]。この一連の研究において、この結果に到達するのに我々は実に15年の歳月を費やした。成果が常に急がれる昨今の状況では考えられないような大変悠長な仕事になってしまった[1]。

4.2 ナノグラニューラー物質における TMR の圧力効果

Co-Al-O は非晶質アルミナの中に Co の微粒子が散布された構造を持ち、トンネル効果により特異な電気伝導をする。また、Co 微粒子のスピンがトンネル伝導に影響を与えるため大きな TMR を示す。加治らはこの系に圧力をかけ、TMR や輸送現象を詳細に調べた[21]。これらの結果を解析することにより、圧力は微粒子のサイズよりも粒子間距離に強く影響を及ぼすこと、また Fig. 10 に示すように 4.2 K でトンネル効果を増大させ、TMR の大きさを増加させることを明らかにした。更に圧力を上げるとパーコレーションの効果により、トンネル効果はなくなり、図に示すように TMR は急激に小さくなった。これらの結果は“量子効果であるトンネル伝導に圧力をかける試み”で学会から注目された。更に、TMR の圧力効果の測定は昇と桜庭らにより、ハーフメタルホイスラー合金 Co₂MnSi を

Fig. 9. Magnetoresistance (MR) curves at 4.2 K for two magnetic multilayers at high pressure, (a) Fe/Cr(10) and (b) Fe/Cr(30). The arrows indicate increasing pressure.

Fig. 10. MR ratio of granular oxide Co-Al-O at various temperatures as a function of pressure.

ベースとしたナノ構造物質にも応用され、興味ある結果を得た[22]。

5. コンプトン効果を用いた金属リチウムの高圧力下における電子状態

これまで3, 4で述べてきた測定は電子状態を電気抵抗や熱膨張で“間接的に”みる方法であった。高圧力下における伝導電子の状態を“直接的に”知る方法としてコンプトン散乱の測定を提唱した。この測定により電子の運動量分布に及ぼす圧力効果を

知ることができる。これは技術的に難しいと当時では思われていたので、装置や光学系の開発など多くの研究者に協力してもらい研究を進めた。東北大学の金研の伊藤先生と協力して、通常の γ 線源を用いて予備実験を行い、最終的には高エネルギー物理学研究所で下村さんたちと協力して、放射光を使ってFig. 11に示すような金属Liの高圧力下のコンプトンプロファイルの観測に成功し、伝導電子のフェルミ面が高圧力下で広がっていることが明らかとなり[23]、その結果が自由電子模型で説明できることを示した。この実験により高圧力下のコンプトン散乱実験が可能であることを示すことができた。その後、ヨーロッパなどで同様な実験がなされた。

6. おわりに…高圧力下の物性研究体制についての一考察

私が熊本大学の助教授となった頃（1987, 40歳11か月）、上でも述べたように、教養部の廃止が多くの大学で進むと同時に学部や研究センターの改組・新設など我が国の大学は生き残りをかけて新しい体制の構築に乗り出していた。九州内の大学でも既存の学部が新しく聞いたこともないような名前の学部として生まれ変わって行ったのを目の当たりにした。物性研究も当然ながらこの荒波を受けることとなり、当時の物性委員会では「物性研究拠点整備

Fig. 11. Compton profile $J(q)$ of Li (a) at ambient pressure and (b) at 1.8 GPa.

計画」(平成 12 年学術会議より対外報告が出た)と言う案を作り、全国的な物性研究者のネットワークを作ろうとしていた。当時所属していた熊本大学でも教養部が廃止され、新しくどのような研究教育体制を作るべきか議論されていた。極限物性関係では衝撃エネルギー実験所や理学部極低温室が学内にあったが、これらを統合して省令施設に格上げしようという計画があり、わたくしもそれに微力ながら加わることとなった。この案は関係者の努力もあり、平成 11 年度より「衝撃・極限環境研究センター」として定員増を伴って発足することとなった。各大学で拠点計画を基にその大学独自の物性物理の研究体制が築かれていったが、平成 16 年以降の大学の独立行政法人化の影響で現在、また新しい物性研究の体制が議論されていると聞く。物性研究は素粒子・原子核・宇宙分野の巨大科学と違って、装置も小規模である。そのような視点で全国の高圧科学を見ると各地方に特色ある装置が開発されていることに気付く。今後はそのような装置を開放し、ネットワークを築けば当該分野はより発展するものと考え

謝 辞

本論文で紹介した一連の研究は多くの方々のご援助によるものです。低温高圧の研究の手ほどきは故三井惟靖教授(北海道大学)及び毛利信男教授(北海道大学、東京大学)から受けました。熊本大学在職中は上床美也氏(現、東京大学)、加賀山朋子氏

(現、大阪大学)に、また、九州大学では大橋政司氏(現、金沢大学)、中野智仁氏(現、新潟大学)及び本多史憲氏(現、東北大学)の支援にあずかりました。この受賞の機会に厚く御礼申し上げます。また、研究室の多くの学生、同僚、及び内外の共同研究者のお世話になりました。ここに心から謝意を表します。最後になりましたが、本学会賞の受賞は身に余る光栄であります。関係者の方々に心より感謝いたします。

参考文献

- [1] 巨海玄道: *Magnetics Jpn.*, **5**, 405 (2010).
- [2] 巨海玄道, 加賀山朋子: *高圧力の科学と技術*, **4**, 238 (1995).
- [3] F. Honda, S. Kaji, M. Ohashi, G. Oomi, T. Eto, T. Kagayama: *J. Phys. Condens. Matter*, **14**, 11501 (2002).
- [4] J.S. Kouvel, R.H. Wilson: *J. Appl. Phys.*, **32**, 435 (1961).
- [5] 上田和夫, 大貫惇睦: *重い電子系の物理*(裳華房, 1998).
- [6] 最近の高圧力下の振る舞いに関する総合報告として以下の文献がある。
Y. Uwatoko, I. Umehara, M. Ohashi, T. Nakano, G. Oomi: *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths*, **42**, Chap. 252 (2012).
- [7] *Novel Pressure-induced Phenomena in Condensed Matter Systems*, *J. Phys. Soc. Jpn.*, Suppl. A, **76** (2007) (Proc.Intern.Workshop on Recent Progress in the High Pressure Research, ed.by T. Kagayama, M. Ohashi, Y. Uwatoko).

- [8] T. Kagayama, G. Oomi, H. Takahashi, N. Mori, Y. Ōnuki, T. Komatsubara: Phys. Rev. B, **44**, 7690 (1991).
 - [9] G. Oomi, T. Kagayama, Y. Uwatoko, H. Takahashi, N. Mōri: J. Alloys & Compd., **207 & 208**, 278 (1994).
 - [10] M. Ohashi, G. Oomi, S. Koiwai, M. Hedo, Y. Uwatoko: Phys. Rev. B, **68**, 144428 (2003).
 - [11] T. Kagayama, G. Oomi: J. Phys. Soc. Jpn., **65**, Suppl. B, 42 (1996).
 - [12] T. Kagayama, G. Oomi: “*Transport and Thermal Properties of f-electron Systems*” eds. G. Oomi, H. Fujii, T. Fujita (Plenum, New York), 155 (1983).
 - [13] 巨海玄道, 本多史憲, 加賀山朋子, 大貫惇睦: 日本物理学会誌 (最近の研究から), **56**, 517 (2001).
 - [14] K. Nishimura, G. Oomi, S.W. Yun, Y. Ōnuki: J. Alloys & Compd., **213 & 214**, 383 (1994).
 - [15] G. Oomi, T. Kagayama, Y. Ōnuki: J. Alloys and Compd., **271–273**, 482 (1998).
 - [16] S.S. Saxena, P. Agarwal, K. Ahilan, F.M. Grosche, R.K.W. Haselwimmer, M.J. Steiner, E. Pugh, I.R. Walker, S.R. Julian, P. Monthoux, G.G. Lonzarich, A. Huxley, I. Sheikin, D. Braithwaite, J. Flouquet: Nature, **406**, 587 (2000).
 - [17] T. Nakano, M. Ohashi, G. Oomi, K. Matsubayashi, Y. Uwatoko: Phys. Rev. B, **79**, 172507 (2009).
 - [18] M.N. Baibich, J.M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, P. Etienne, O. Creuzet, A. Friederich, J. Chazelas: Phys. Rev. Lett., **61**, 2472 (1988).
 - [19] G. Oomi, T. Sakai, Y. Uwatoko, K. Takanashi, H. Fujimori: Physica B, **239**, 19 (1997).
 - [20] K. Suenaga, S. Higashihara, M. Ohashi, G. Oomi, M. Hedo, Y. Uwatoko, K. Saito, S. Mitani, K. Takanashi: Phys. Rev. Lett., **98**, 207202 (2007).
 - [21] S. Kaji, G. Oomi, M. Hedo, Y. Uwatoko, S. Mitani, K. Takanashi, S. Takahashi, S. Maekawa: J. Phys. Soc. Jpn., **74**, 2783 (2005).
 - [22] M. Nobori, T. Nakano, J. Hasegawa, G. Oomi, Y. Sakuraba, K. Takanashi, Y. Miura, Y. Ohdaira, Y. Ando: Phys. Rev. B, **83**, 104410 (2011).
 - [23] G. Oomi, F. Honda, T. Kagayama, F. Itoh, H. Sakurai, H. Kawata, O. Shimomura: Jpn. J. Appl. Phys., **38**, Suppl. 38–1 (1999) 508.
- [2013 年 2 月 15 日受付, 2013 年 4 月 17 日受理]
© 2013 日本高圧力学会