

チェコ研究” 見聞” 録

本多, 史憲
日本原子力研究所先端基礎研究センター

<https://doi.org/10.15017/11066>

出版情報 : 九州大学極低温実験室だより. 5, pp.17-23, 2004-08. Cryogenic Laboratory, Faculty of Science, Kyushu University

バージョン :

権利関係 :

チェコ研究“見聞”録

日本原子力研究所先端基礎研究センター 本多史憲*

私は2001年6月よりこの2003年3月までの約3年間、チェコ共和国の首都プラハにあるカレル大学でポスドクとして、高圧・強磁場・低温といういわゆる多重極限下での希土類・あるいはウラン化合物の磁性の研究を行なって参りました。本稿ではまずチェコという国、プラハという街について簡単に紹介し、次に私が従事したプラハにある科学分野の二大研究機関であるカレル大学、そしてチェコ科学アカデミーの沿革そして現在の研究内容などについて紹介いたします。自然科学分野ではあまり日本から注目されることの少ないチェコですが、歴史に左右されながらも地道な研究活動を続けている姿を少しでも感じていただけたらと思います。

チェコスロバキアという名前は日本人の多くが知っているものの、世界地図を広げて、さてどこにあるかと聞かれると意外に答えるのが難しい国ではないでしょうか。チェコ共和国は地理的には中央ヨーロッパに属します。実際この国の西端にある Cheb (ヘブ) という小さな町には誰がどう測ったか知りませんが「地理上のヨーロッパの中心」という石碑が建っているほどで、名実ともに中欧と言えるでしょう。ドイツ・オーストリア・スロバキア・ポーランドに国境を接するチェコ共和国は人口約 1030 万人 (2004 年 4 月) で国土面積は 78865km² (九州の約 2 倍の広さ) の小さな国です [1]が、プラハをはじめいくつかの街や城などがユネスコの世界遺産に (プラハは街全体) 登録されるほど中世の面影を強く残した美しい国で特にプラハには (図 1) 一年中観光客が絶えません。この国の前身チェコスロバキア共和国は 1918 年に成立しました。その後ヒトラーの率いるドイツにより国が解体されドイツの保護領となるなどの変遷を経て、1946 年選挙により議会民主的な方法で共産党が第 1 党となり共産主義体制へと移行します。しかし政府が歩もうとする独自の社会主義路線は旧ソ連により監視され、日増しに旧ソ連や共産党からの政治的圧力が高まる結果となりました。そして 1986 年、国民の間で『プラハの春』と呼ばれる社会主義革命の機運が高まったものの旧ソ連のワルシャワ条約機構軍の軍事介入により革命は鎮圧され、俗に言う灰色の時代を迎えます。ただ一部の国民の間で言論の自由化、民主化への意志は生きながらえ、記憶に新しいベルリンの壁崩壊にともなう中・東欧の民主化の波に乗り、1989 年に旧ソ連主導の共産主義体制からの脱却 (ビロード革命) を果たします。この革命の発端はカレル大学の学生デモでした。その後 1993 年にスロバキア共和国との分離独立を選んで、現在のチェコ共和国が成立しました。なお、この二国が本年 5 月 1 日に欧州連合 (EU) へ加盟したことは記憶に新しいことです。

カレル大学 (英語名: Charles 大学) は当時のボヘミアの王カレル (神聖ローマ皇帝カレル四世) が 1348 年に創立した中・東欧ではもっとも古い歴史のある大学です。大学の本部は現在も 14 世紀当時と変わらずプラハの旧市街、あのモーツァルトが歌劇“ドン・ジョバンニ”を初演したエステート劇場のすぐ側にあり、今でも教授の認定式や学位の授与などの公的行事は由緒あるセレモニーホールで行われています。

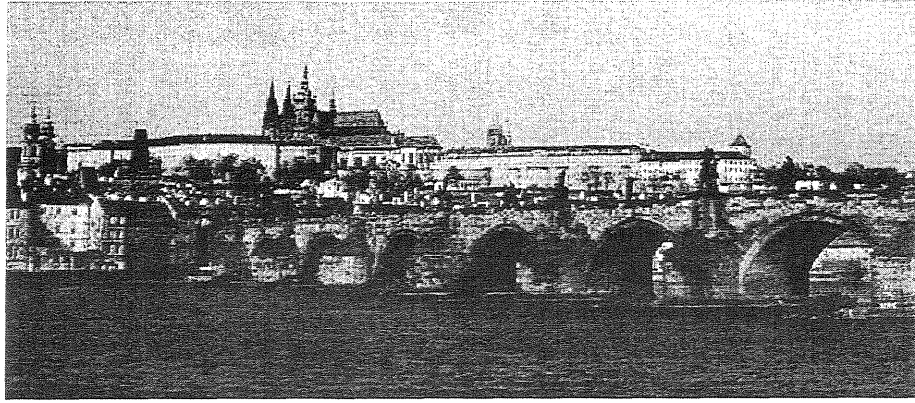


図1 プラハの街並

私が所属した研究室は数学物理学部電子構造学科のセコフスキー教授の研究室で、この学部の主たる建物はプラハの中心から少し離れたプラハ新市街の端にあります。数学物理学部[2]は昨年が設置後 50 周年を迎えましたが、その根幹はカレル大学ではもっとも古い 4 学部のひとつである自然哲学部からの流れを汲んでいます。また有名なアルバート・アインシュタインも一年だけですが教鞭をとったことがあり、講義を行った建物の入り口にそのことを示す碑が掲げられています。

電子構造学科は全体としては 10 数名のスタッフと 20 名弱のポスドク及び博士課程の学生（あと若干名の修士の学生）で構成されています。主な研究対象は磁性体や超伝導体の物性で、遷移金属の d 電子系や希土類やウランの f 電子系化合物の物性を調べています。電子構造学科は学部の中では小さいながらも役割分担がはっきりしており非常に効率的に仕事をしていて学部内での論文発表数などの評価はもっとも高く予算的にも優遇されていました。この学科は大きく 3 つのグループに分かれています。1 つは私が籍をおいた希土類やウラン化合物の新しい試料の作成及びその磁性を研究するグループです。このグループの研究設備の主なものとしては、試料作成に関わるものが、多結晶試料を作成するアーク炉、三アーク型単結晶試料育成装置（回転引き上げ法）、そして昨年新たに設置された固相エレクトロトランスポート精製装置（試料純良化）の 3 つあり、1 名のスタッフと数名の学生を中心に希土類やウランの化合物を次々に作り出しています。そしてこれらの物性を測定する装置として、Quantum Design 社の PPMS（物性測定システム）付属マグネットは 9 テスラ、14 テスラの 2 台を持っています。PPMS のオプションとしては電気抵抗、比熱、磁化の測定のほかに、熱伝導、熱電能測定装置が使用でき 1.85K から室温までの測定が可能（比熱、電気抵抗は ^3He オプションを用いて 0.4K からの測定が可能）となっています。また私も開発に携わった PPMS に装着可能なキャパシタンス型歪み計（図 2）を作成し 2K から室温の上記磁場範囲での熱膨張や磁歪の測定が可能となっており PPMS の性能をほぼフルに使いこなしています。

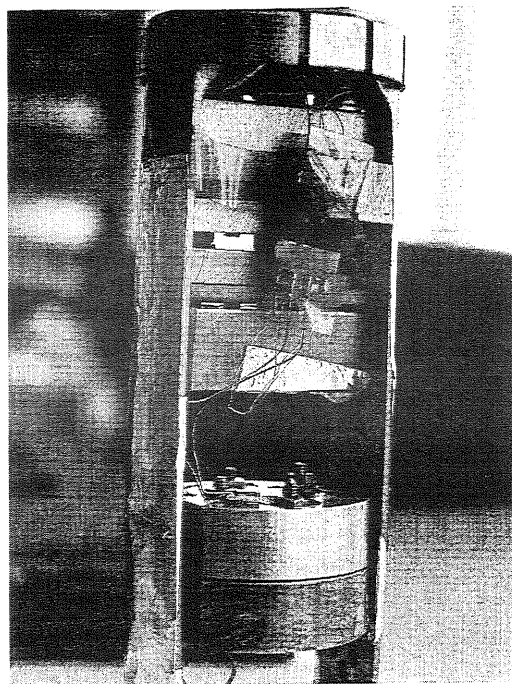


図2 Quantum Design 社の PPMS 用キャパシタンスセル

2つめのグループは f 電子系化合物の他にも金属人工格子など d 電子系化合物の結晶構造や界面の状態を X 線回折によって明らかにすることを主たるテーマとしています。われわれの研究室が作成した試料の同定（ラウエカメラや X 線ディフラクトメーターによる）はもちろん、寒剤（液体ヘリウムなど）を直接試料に吹き付ける事で 10K から室温までの測定が可能な粉末 X 線回折装置が稼働しており、試料の結晶構造パラメータの温度依存性を測定し、結晶構造の変化のみならず熱膨張も 10^{-4} オーダーで定量的に解析することができます。また X 線小角散乱実験装置もあり、現在ナノテクノロジーとして注目をされている金属人工格子の面間隔の精密測定や人工格子の磁気特性に大きな影響を及ぼす界面のみだれを詳しく調べることが出来るようになってきました。これら人工格子の研究はドイツのダルムシュタットの大学との共同研究によるものです。

そして残るもう一つは理論系のグループとなります。このグループも人員が充実しており、磁気構造や電子構造に関する計算をこなす傍ら、実験グループと双方のデータを評価し合い、討論を重ね着実に研究を行っています。このような研究室のグループ志向の協力態勢は欧州の典型的な研究スタイルと言えましょう。また毎週1回のセミナーでは主に博士課程の学生が最近の研究結果などを発表し、これを時間の許す限り、集まったスタッフや他の学生も併せて結果について討論を行い時には厳しい意見も言い合いながら、今後の実験方針について話しあっていくようにしています。数年前までチェコ人の学生はコンピュータ科学などに進み、物性分野の博士課程にはウクライナからの留学生が多かったのですが、最近の傾向としては物性物理に興味を持つチェコ人学生も増え、スタッフも喜んでいるようです。

そしてもう一点、カレル大学の特徴を挙げるならそれは共同研究を行う研究機関の数です。これによって研究室で行うことの出来ない実験にも積極的に学生やスタッフを派遣し自らの手でデータを取ることが出来ます。例えば中性子回折実験ならば、フ

ランス、Grenoble の ILL やドイツの Hahn-Meitner Institute、放射光を用いた実験では同じく Grenoble の ESRF。強磁場での測定はロスアラモスの強磁場研究所や東京大学物性研究所、などと必要な実験があればすぐにいくつかの出張可能な研究機関を挙げることができます。特に ILL、ESRF はチェコがメンバー国として年間の経費の一部を負担しているため、申請をすればほぼ確実にマシンタイムを得ることができるという非常にありがたい状況にあります。

プラハにはチェコ科学アカデミーというカレル大学と並ぶ政府の科学研究機関があります。この機関は創立は52年前と比較的新しいのですが、物理学をはじめ生物その他多くの研究所をチェコ国内に持っています。ちなみに私は縁あってこのチェコ科学アカデミー物理学研究所にもポスドクとして同時に雇用されていました。アカデミーでの所属は物理学研究所、J.カマラード教授の高圧物理研究部門です。同教授はチェコでは古くから高圧研究に携わり、希土類および鉄系化合物の磁性の圧力効果を重点的に研究しています。また一方で食料品を扱う企業と共同で食品の圧力を用いた加工に関する研究も行っており、“圧力”を基礎から応用まで広い範囲での研究に有効利用しています。この研究室の特色はやはり圧力下での研究であり、CuBe 製ピストンシリンダー型高圧装置や対向アンビルを用いたブリッジマン型高圧装置を持っており、低温や磁場中での電気抵抗測定や AC 帯磁率測定が可能です。また、歪みゲージとよばれる抵抗素子を用いた高圧下での熱膨張測定も行うことができます。他には QuantumDesign 社の SQUID 装置があり、2-350K、5T までの精密磁化測定が 1GPa の圧力下まで測定可能です。また PPMS に実装可能な超硬合金 (MP35N[3]) を用いたピストンシリンダー型高圧装置を現在開発中で、3GPa 程度までの電気抵抗が 14T の磁場中で近々測定可能になる予定です。なお、この研究室はカレル大学の電子構造学科と相互交流 (Joint) 研究室として認められており、お互いの持っている装置を相互利用し円滑に研究を進めることができるよう配慮がなされています。これはお互いの装置を使用できるという点でもメリットがあるのですが、現実的には修士や博士課程の学生を受け持つことが出来ないアカデミー側も大学を通じて学生を受け入れることができ、研究のスピードを維持することができるという点で非常に良く機能している共同研究プログラムです。ちなみに現在チェコ科学アカデミー物理学研究所では日本人の学生がカレル大学の博士課程に所属しながら太陽電池特性を調べるための基礎研究を行っています。また素粒子理論のポスドクとして (門外漢なので私にはよくわからないのですが) 余剰次元に関する研究でゲージ階層性問題について理論的・現象論的側面から研究を行っている日本人もいます。チェコは CERN の state member であることもあって、実験研究者が多く、現象論の研究をするのに良い場所であるため選んだとの話でした。上で述べた ILL の場合と同じようにチェコの科学研究機関は小さいながら欧州の大型研究施設の重要な共同利用メンバーとなっており、次第に西側の研究者の注目も集めるようになっていきます。

Praha ではポストドクとして、*f*電子系で強い相関を持つ化合物の物性測定を主に行なってきました。ここでその一部を紹介いたします。ウランの三元系化合物 UNi_2Si_2 はその低温で3つの異なる磁気構造を示す一風変わった反強磁性体です。 UNi_2Si_2 は ThCr_2Si_2 型正方晶の結晶構造 (図3) をもち、正方晶のコーナーと体心の位置にウラン原子のなす面がありその面に挟まれるように Ni_2Si_2 層が存在します。この結晶構造から容易に推測できるようにこの物質は大きな結晶磁気異方性を示すことが知られています。この結晶構造を持つウラン化合物で磁気秩序を示すものはほとんどの場合ウランのみが磁気モーメントを担い、遷移金属元素は磁性を担いません。そこでこの化合物には主に2つの磁氣的な相互作用が存在することがわかります。ひとつは *c* 面内のウラン原子同士の直接交換相互作用、もう一つが *c* 軸方向の遷移金属の層を介した間接的な相互作用です。これまでの研究から UT_2Si_2 においてはウランの磁気モーメントは *c* 軸に平行で、かつ *c* 面内では強磁性的に結合し (つまり $J < 0$)、面間の結合が物質によって強磁性的であったり、反強磁性的であったりするということがわかっています。さて、 UNi_2Si_2 もその例に違わず、面内強磁性で面間が反強磁性の相関を持つ物質で、室温から温度を下げていくと 124K で反強磁性秩序(IC)がみられます。この相では磁気秩序の周期が格子の周期と不整合 (incommensurate) なスピン密度波がたつことが中性子回折から明らかにされています。さらに温度を下げていくと 103K で単純な反強磁性相(AF-I)があらわれます。これは *c* 軸方向の磁気モーメントの並びが $\uparrow\downarrow\uparrow\downarrow$ (+*c*向きを '+', -*c*向きを '-' で表し (+-) と表現します) となるもので別の言い方で type-I の反強磁性といわれます。この物質が他と違うのはこのような単純なオーダーがあるにもかかわらず、さらに温度を下げると 43K で自発磁化を持つ反強磁性(UAF、uncompensated antiferromagnetic)が現れるという点です。この自発磁化は *c* 軸方向の磁気秩序が $++-+-$ という繰り返しになっていることから起こります。つまり、磁氣的なエネルギーだけをみると $\uparrow\downarrow$ の方が安定なのにもかかわらず、より低温で $\uparrow\uparrow\downarrow$ の磁気構造が出現するというのがこの物質の不可解な点です。

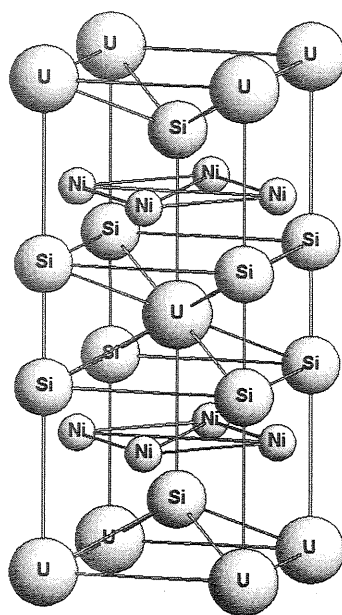


図3 UNi_2Si_2 の結晶構造

これまでの研究からこの UNi_2Si_2 に圧力をかけると UAF 相が次第に安定となり、3.2GPa で AF-I 相を完全に駆逐するということが明らかにしました[4]。このことから、UAF 相が実現するためには、i)原子間距離と ii)ウランの持つ $5f$ 電子と遷移金属の d 電子の混成 ($f-d$ 混成効果) が重要なパラメータであるということが考えられます。実際にこの物質とよく似た物性を示す UPd_2Si_2 は AF-I 相が基底状態であり、UAF 相は磁場中でしか現れません[5]。Pd は Ni と同数の d 電子を持ちますが、Ni が $3d$ なのに対して、Pd が $4d$ であるため、Pd の方が原子間距離は大きく、さらに一般に $3d$ から $4d$ になると d 電子の状態密度がフェルミ面より深くなることから、 $f-d$ の混成が小さくなり、上の i)、ii) と矛盾しません。そこで我々はこの事実を実験的に確かめるために UNi_2Si_2 の Ni サイトを Pd で置換した化合物を作成し磁性を調べ[6]、わずか 9% の Pd 置換で UNi_2Si_2 の UAF 相が消失することを見いだしました。9% の Pd 置換では格子定数はそれほど大きく変化しないため、この UAF の形成には ii) の $f-d$ 混成がより重要なパラメータであると推測されます。このことを確かめるために $\text{U}(\text{Ni}_{0.91}\text{Pd}_{0.09})_2\text{Si}_2$ の高圧下における電気抵抗 (UAF 相の発現は電気抵抗の大きな変化として容易に観測できるため) を測定しました。高圧下における $\text{U}(\text{Ni}_{0.91}\text{Pd}_{0.09})_2\text{Si}_2$ の電気抵抗の温度依存性を図 4 に示します。この中の 0.75GPa で見られる電気抵抗の低温での立ち上がりが UAF 相の発現を意味します。つまり圧力によって $5f$ 電子がより遍歴的になり $f-d$ の混成が強くなったことで UAF 相が現れたと考えられます。またこの圧力によって誘起される磁気秩序相が UAF 相であることは Berlin の Hahn-Meitner Institute で筆者らが最近行なった高圧下中性子回折実験で確認されました (図 5)。今回は紙面の都合上細かい説明は割愛しますが、これらの詳細な結果については近く論文として発表する予定です。

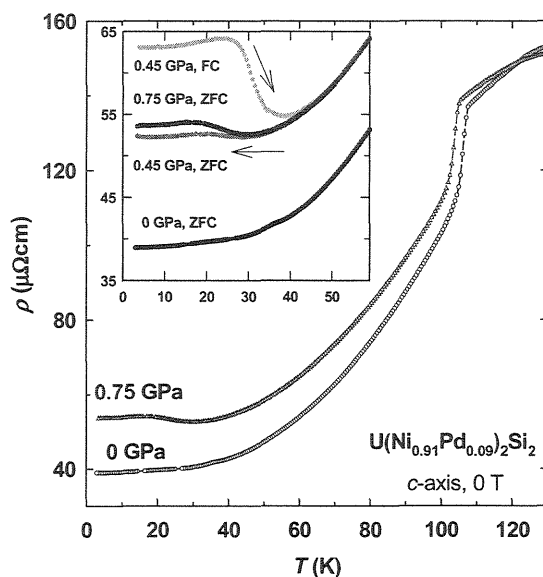


図 4 高圧下におけるの電気抵抗の温度依存性

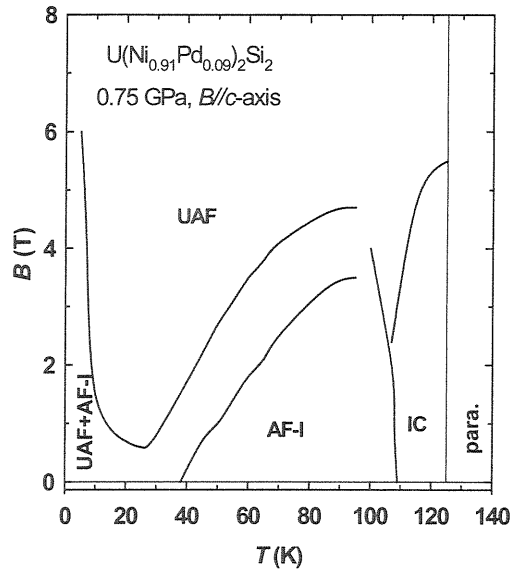


図5 高圧下における $U(Ni_{0.91}Pd_{0.09})_2Si_2$ の磁気相図

本稿によりチェコでの科学研究へ興味をすこしでも持っていただけたら幸いです。尚、チェコのカレル大学数学物理学部のセコフスキー研究室では期間の長短を問わず日本人の学生及び研究者が滞在し研究を行うことを心より歓迎していますので、もしご希望の方がいらっしゃいましたら筆者までお知らせいただければ連絡先などお知らせいたします。

*)honda@neutrons.tokai.jaeri.go.jp

[1] <http://www.czechinfocenter.com/e.mag/czech/basic.html>

[2] <http://www.mff.cuni.cz/>

[3] F. Honda *et al.*, *J. Phys.: Condens. Matter* **14** (2002) 11501.

[4] F. Honda *et al.*, *Phys. Rev. B* **61** (2000) 11267.

[5] T. Honma *et al.*,

[6] F. Honda *et al.*, *Euro. Phys. J. B*, **30** (2002) 313.