

戦略的基礎研究推進事業 超高圧・超強磁場・極低温 - 複合極限の生成と物性研究

特集 プロジェクト研究

遠藤 将一*

CREST : Generation of complex extreme conditions of pressure, magnetic field and low temperature to search for new phenomena

Key Words : complex extreme conditions, high pressure, high magnetic field, low temperature, new phenomena

1. はじめに

科学技術振興事業団の実施する「戦略的基礎研究推進事業」の平成8年度の研究提案募集に採択され、現在、実質的には2年目を終えたところである。我々の課題は研究領域“極限環境状態における現象”に属する。

事業の趣旨は、“「科学技術創造立国」を目指し、明日の科学技術につながる知的資産の形成を図るため、大学や国立試験研究機関等に所属する研究者がその研究機関の研究ポテンシャルを活用しつつ基礎研究を推進する”ことである。すなわち、事業団の掲げる目標は

- (1) 日本の基礎研究の抜本的強化
- (2) 明日の科学技術の開拓
- (3) 新産業の創出につながる知的資産の形成

となるが、その際、全体の嵩上げではなく研究ピークの形成、即ち、Core Research for Evolutionary Science and Technology (CREST = 鶏冠, 頂上)の達成を強調している。

そのために、代表者は自らの発案と concept を実現するためのチームを組織して、5年間研究にあたる。研究費の総額は平均数億円で、新しい設備の導入、材料・消耗品の購入、既存の設備の改造、研究

発表のための旅費、シンポジウム開催の経費などにあてられる。特徴的なことは、研究員、研究補助員、技術院を雇用できることである。これによって、研究が大きく進展するとともに、若手研究者(ポストドク)、外国人研究者等に貴重な機会が与えられる。

2. 研究課題要旨

極限条件の育成は自然をより深く理解する上で必須である。液体ヘリウム温度における超伝導や超流動といった驚くべき現象の発見がその例である。強磁場や超高圧の極限も同様な役割を担ってきた。即ち、極低温は顕著な量子効果を、強磁場は磁性の根源であるスピンの制御を、そして超高圧は高密度相を誘起し、物質の示す新しい現象を生み出してきた。そして今、複合極限下では、さらに多様な物性研究を展開し、物質の本質をより多面的に追求することが可能となるというのが世界の認識である。

本研究は、それぞれ異なる極限に属する研究者が、その持てる力を結集し、世界に先駆けて、最高水準の複合極限技術の開発を目指すものである。その結果、例えば高密度相の量子効果として、金属水素や鉄の超伝導性の探索等といった夢のような物性研究が現実のものとなる。本研究の成果は、単に物性の基礎的研究に刺激を与え発展を促すにとどまらず、広く応用に道を拓くであろうことは疑いのないところである。

3. 研究メンバー

極限科学研究センター：遠藤将一(代表)、金道浩一、小林達生、石塚 守
基礎工学部：天谷喜一、那須三郎、鈴木 直、小林融弘、宮城 宏、清水克哉、長柄一誠



*Shoichi ENDO
1939年11月8日生
1969年大阪大学大学院基礎工学研究科物理系専攻修士
現在、大阪大学・極限科学研究センター、教授、工博、超高圧物理
TEL 06-6850-6675
FAX 06-6845-4474
E-Mail endo@rcem.osaka-u.ac.jp

他に事業団雇用の研究員、技術員(計3~4名)が常時、研究に参加している。

4. 実施予定テーマと特徴

(1) 複合極限環境の生成および測定技術の開発

超高压, 超強磁場, 極低温からなる複合極限条件下における物性測定技術の開発を主目的とする。それぞれの目的に応じて, 圧力ではピストン・シリンダーとダイヤモンド・アンビル・セル, 磁場では, 超伝導マグネットとパルスマグネット, 低温では液体ヘリウムクライオスタットと希釈冷凍機などの中から選び組み合わせることになるが, 本計画ではより高い圧力と磁場, より低い温度での測定を狙う。その際に多くの相反する要求が現れるため, 複合極限環境実験では環境生成装置のデザインと材料の選択, 測定素子の設計と配置等に様々な工夫が必要となる。これら困難を克服して, 達成する具体的課題は

- (ア) 数 mK・300 万気圧下の電気抵抗測定
- (イ) 150 テスラ非破壊パルスマグネットの創出
- (ウ) 0.3-200K・100 万気圧下の高感度磁化測定
- (エ) 超高压・パルス強磁場下の磁化測定
- (オ) 超高压下の NMR・ESR の開発
- (カ) 超高压・低温下の誘電測定

などである。

(2) 複合極限環境下の物性研究

これらの技術を駆使して以下の課題を研究する。

- (ア) 極低温・超高压下の圧力誘起超伝導
- (イ) 強相関電子系の超伝導とメタ磁性
- (ウ) 圧力誘起軌道再配列と磁気相転移
- (エ) 低次元磁性体の量子効果
- (オ) 新しい強誘電相の探索

などである。

私の関係する超高压実験ではこれまで X 線回折や光学実験が著しく進歩した。アンビルとして使われるダイヤモンドの X 線や光に対する透過性が優れていることにも起因するが, 実験のやり易さも一因である。強力な光源と高感度の検出器があればかなりの成果が出せた。本プロジェクトでは, 今まで手の出せなかった極微量の試料がネックとなる実験, しかもシグナルの検出に電極やコイルあるいは素子などを試料にできるだけ近くアンビルやガスケットを避けながらセットしなければならないという難しい実験に敢えて挑戦して新しい手法を開発したい。そ

れらを用いて, もちろん我々も新しい知見を得るが, 日本の材料あるいは物性研究者に貴重な手段を提供することになろう。

5. 現在までの主な成果

〈複合極限技術の開発〉

・超高压の発生と極微小電極の作製

超高压発生用ダイヤモンドアンビルセルによる 200 GPa (万気圧) 以上の超高压発生技術の確立及び超高压下電気抵抗測定技術の開発に進展が見られた。

・非破壊実用型マグネットによる 80.3 テスラの発生

非破壊で, 測定に際し実用的な空間を持つマグネットに 80.3 テスラの最高磁場を発生した。線材に高強度, 高伝導の銅銀合金線を用い, 外部よりマレージング鋼で補強することによって初めて可能となった。このタイプのマグネットによるこれまでの世界記録は 73.4 テスラであった。

・超高压・パルス強磁場下の磁化測定法の開発

渦電流による発熱とノイズを避けるため非金属性アンビルとガスケットを用いて 10 GPa の発生を確認し, 微小試料 (Fe-Ni インバー合金) の磁化を IC 回路作製技術を用いた検出コイルによって測定することに成功した。

・超高压・精密磁化測定装置の改良

新しいクライオスタットを開発し, これまでに比べて感度を一桁 ($10^{-10} \sim 10^{-11}$ emu), 測定温度の上限を 2 倍以上 ($1.4 \leq T \leq 70$ K) 上げることができた。120 GPa 以上でのニオブの超伝導転移の測定に成功した。

・高压下の誘電測定法の開発

多面体アンビル冷却型高压装置を用いて, 10 GPa までの静水圧・1.5 K までの低温下での誘電率測定法を確立した。

〈複合極限下の物性研究〉

・超高压下圧力誘起超伝導の探索

極低温・超高压技術の進展により, 新たに固体酸素, 固体硫黄の超伝導を 100 GPa 超高压下電気抵抗測定に成功した。転移点は, それぞれ 0.6 K 及び 12 K であった。

・反強誘電体 PbZrO_3 の圧力誘起相転移の発見

実用上最高の圧電素子である PZT の構成成分 PbZrO_3 (ペロプスカイト構造) について高压下で X 線回折, 誘電測定, 顕微鏡観察を行い, 78 GPa ま

でに4つの相転移を見出した。

・水素結合型強誘電体 KD_2PO_4 の T_c の圧力依存

強誘電体相転移温度が約7GPaで0Kに達し、消滅することを見出した。 KH_2PO_4 のその約4倍の同位元素効果を示した。 $T_c=0$ でもキュリー定数は有限で、途中の圧力で転移機構が秩序-無秩序型から変位型へ転換した可能性を示す。

・ $S=1$ 一次元ハイゼンベルグ型反強磁性体の磁性

ハルデン物質NDMAZにおいて、ギャップの消失する臨界磁場13テスラでの極低温比熱及び極低温磁化過程の実験から $T \leq 0.3K$ で長距離秩序を示す異常を見出した。また、交換相互作用に交替のある場合にはその交替化によってハルデン相とダイマー相が存在すること、そしてそれらの相境界ではギャップが消失すること、さらにダイマー相においては中間磁場にプラトーが観測されることなどを強磁場磁化過程によって初めて明かにした。

・マグネタイトの超高压・低温下メスbauer分光

マグネタイトの高圧相は室温26GPa以上の高圧下で得られ磁気秩序を示さないことが知られている。今回、ダイヤモンドセルを用いて高圧・低温下測定を行い、50GPa、5.7Kで高圧相の2つのサイトを占めるFeの内部磁場の値は45テスラ及び50テスラであることが判明した。サーマルスキャン法によりネール温度は250Kであると決定された。

・高圧処理 $ZnMnS$ (半磁性半導体) における赤外発光の生成

超高压によりZB構造から岩塩構造へ相転移した

試料を常圧に戻すと、結晶構造は元に戻るが、光学的性質が激変することを見出した。Mnイオン内の電子遷移による可視発光が消失し、代わって強い赤外発光が現れた。

〈理論的研究〉

・分子性固体酸素の圧力誘起金属化と磁性消失に関する理論的予測

分子性固体酸素(α 相, β 相, ϵ 相)の電子状態をフルポテンシャルLMTP法に基づいて体積(圧力)を変化させて計算し、100GPa以下で磁性が消失し、100GPa以上の圧力では常磁性金属状態が最も安定であるという結果を得た。局所密度近似での計算ではあるが、この結果は100GPa付近で金属状態さらには超伝導状態が観測されたという実験結果を支持するものである。

・圧力下の固体ヨウ素の金属化、分子解離についての第一原理計算

圧力下の固体ヨウ素の金属化、分子解離、ラマン・アクティブAgモードのソフト化及びハイパーファイン・パラメターの圧力依存性について、第一原理計算(FP-LMTO)法に基づく、詳細な研究を行った。

・超高压縮固体水素の振動モードと振動数

実験的にラマン散乱及び赤外吸収で観測されているメガバール領域での圧縮水素の振動モードとその振動数を説明するための第一原理計算をおこない、hcp構造の可能性が高いことを示した。