

## 「特別推進研究」研究期間終了後の効果・効用、波及効果に関する自己評価書

- 研究代表者氏名 田村 剛三郎（京都大学・工学研究科・教授）
- 研究分担者氏名 沼倉 宏（京都大学・工学研究科・助教授）  
乾 雅祝（広島大学・総合科学部・助教授）  
星野 公三（広島大学・総合科学部・教授）
- 研究課題名「放射光を用いた超臨界金属流体の静的・動的構造の解明」
- 課題番号 11102004
- 補助金交付額（直接経費のみ）

平成11年度	56,000千円
平成12年度	74,000千円
平成13年度	68,000千円
平成14年度	26,000千円
平成15年度	9,000千円

### 【研究期間終了後の効果・効用、波及効果に関する内容】

#### 1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか。

##### (1) 概要

研究期間終了後も、引き続き京都大学工学研究科に所属し、SPring-8の放射光を用いた超臨界金属流体の構造研究を継続・発展させてきた。

もともとこの研究は、原子や分子が凝縮して金属になるとき、どのような過程を経て金属になるのか、逆の見方をすれば、金属はどのように膨張・解離して絶縁体になるのかという、物質科学の基本に根ざす素朴な疑問から出て来たものである。これを調べるために、実験室レベルで実現可能な臨界点を持ち、それぞれが個性豊かな性質をもっている三種類の金属流体、すなわち水銀、アルカリ金属、セレンを取り上げた。これらは、温度と圧力を変えながら液体・気体臨界点を迂回することによって、液体から気体へと体積を大幅にかつ連続的に膨張させることができる。これらの金属流体に対して、三種類の構造解析手法、すなわちX線回折（短・中距離構造の解明）、X線小角散乱（長距離構造）およびX線非弾性散乱（ダイナミクス）測定を横断的に行うことによって、金属流体が膨張・解離してゆくとき原子レベルでどのような構造変化が起きているかを調べた。我々はこの研究を誰かがいつかは成し遂げなければならない重要な研究であると位置づけた。しかしながら、研究期間終了後の審査部会の所見に述べられているように、この研究は各ステップ毎に実験技術の開発が要求される大変難しいものであ

った。研究期間終了時点では、水銀とセレンについてそれぞれ三種類の構造測定が完了し、アルカリ金属についてはX線回折、X線小角散乱測定が終わり、X線非弾性散乱測定のみが未完の状態であった。アルカリ金属の研究が遅れたのは、反応性の強いアルカリ試料を 1800°C もの高温に保ちかつX線実験を可能にする試料容器をいかに作るか、その開発が容易でなかったことによる。

研究期間終了後、これまでに得られたデータをもとに種々考察を行った結果、新たに二つの問題が浮き彫りになった。ひとつは、水銀の金属 - 非金属転移に関するもの、もうひとつは、アルカリ金属中の電子ガスの挙動に関するものである。後者は、研究期間終了後の中心テーマとなった。

### 1) 水銀の金属 - 非金属転移に伴う静的・動的構造変化

流体中では原子の並び方がランダムであり、また一様で等方的であるために、膨張過程で金属 - 非金属転移が起きたときマイクロ構造に顕著な変化は現れないのではないかと考えがちである。しかし実際には、X線回折実験で明らかになったように、水銀が金属 - 非金属転移を起こすとき配位数や原子間距離などの局所構造に顕著な変化が現れる (PRB 2003)。また、X線非弾性散乱測定によって得たいわゆるマイクロな音速が金属 - 非金属転移に伴って異常な振る舞いを示すことが明らかになった。すなわち、分散関係から得られたマイクロな音速は、金属 - 非金属転移領域において、超音波測定から求めたマクロな音速の3倍にも上る。(PRL 2004)。このように流体水銀では金属 - 非金属転移領域で静的および動的構造に顕著な変化が起きることが分かった。しかし、この構造変化が金属 - 非金属転移とどのように関わっているかという問題はなかなか難しい問題で、研究期間終了時点では大きな宿題として残された。従来、水銀の金属 - 非金属転移は、それが二価金属であるため、体積膨張と共に s バンドと p バンドの重なりが解けることによって起きると考えられてきた。この考え方には構造変化は想定されていない。我々の結果はこの単純な考え方がうまく行かないことを示している。一方、ロシアのランダウは 1943 年に流体水銀の金属 - 非金属転移の可能性について言及し、それが臨界点に到達する少し手前の液体側で起こること、しかもそれが体積や電気伝導度の跳びを伴う一次相転移であると予想した。その後、この予言に啓発されて旧ソ連やドイツで行われた実験では、金属 - 非金属転移が臨界点手前の液体側で起きることがわかったが、体積や電気伝導度の跳びはなく緩慢な変化しか観測されなかった。それ以来、この一次相転移という考え方は否定され、長く忘れ去られてきた。我々は、改めて一次相転移の観点から実験結果を見直すことにした。とくに、長距離構造 (密度のゆらぎ) に関わる X線小角散乱の結果に着目した。このとき問題になったのは、金属 - 非金属転移領域が臨界点に接近しているため、金属 - 非金属転移特有の何かがあったとしても大きな臨界散乱に覆い隠されてしまうのではないかということであった。実際、密度のゆらぎを表す二つのパラメータ、すなわち  $S(0)$  (構造因子の長波長

極限) と  $\xi$  (ゆらぎの相関長) は臨界点に近づくと両者共に発散傾向を示し、これに隠されて金属 - 非金属転移領域で意味のあるゆらぎを抽出することは不可能に思えた。そこで我々は、オルンシュタイン・ゼルニケの液体論に出てくるパラメータ、短距離相関長  $R$  に着目した。 $R$  は、 $S(0)$  と  $\xi$  との比で表され、分子間相互作用の直接的におよぶ範囲を示す。希ガス流体のように液体から気体まで分子間相互作用のタイプが変わらない場合には、臨界点において  $S(0)$  と  $\xi$  が発散しても、 $R$  には特異な変化は現れない。水銀について  $R$  を見てみると、臨界点近傍では  $R$  は最近接原子間距離程度の大きさをもちほぼ一定でありとくに変化はないが、これとは対照的に、金属 - 非金属転移領域で  $R$  は極大を示し、極大値は臨界領域でのほぼ二倍、すなわち第二近接原子間距離程度まで大きくなる。このことから、臨界密度ゆらぎとは異なる金属 - 非金属転移に特有の密度ゆらぎが存在することが明確になった。このゆらぎはこれまでにない新しいタイプのゆらぎである。さらに、 $R$  が大きい値をもつ場合には、流体が二相に分離する傾向、すなわち一次相転移を起こす傾向にあることが理論的に示されており、このことを踏まえると、流体水銀の金属 - 非金属転移は基本的に一次相転移であり、それが密度ゆらぎの形を取って現れたと考えることができる。ランダウの予言から 60 年以上を経て、一度は否定されたランダウの考え方が基本において正しかったことになる。X線回折、X線小角散乱、X線非弾性散乱測定の結果を総合的に捉え直すことによって、流体水銀の金属 - 非金属転移が基本的に一次相転移であり、転移領域では 1nm 程度の広がりをもつ密な領域(金属)と疎な領域(非金属)が 1ps 程度の周期で生成消滅を繰り返しているということが明らかになった。これが、研究期間終了後 3 年目になって分かったことであり、大きな成果である。論文にまとめ (PRL 2007)、同時にプレス発表を行った。

## 2) 低密度流体アルカリ金属：電子ガスの不安定挙動

ルビジウムは一価のアルカリ金属であり、自由電子モデルが成り立つ最もシンプルな金属であると考えられている。融解してもその性質は変わらない。融点(密度:  $1.4\text{gcm}^{-3}$ )から臨界点(臨界密度:  $0.3\text{gcm}^{-3}$ )を超え、気体に至るまで体積を膨張させながらX線回折測定を行った結果、融点からそれほど遠く離れていないところ(密度:  $1.1\text{gcm}^{-3}$ )で、体積膨張により平均原子間距離が増大しているにもかかわらず、実測の原子間距離はむしろ短縮するという意外な事実が明らかになった。金属から非金属への転移ははるか遠くの臨界点付近で起きることがこれまでの研究から知られており、この密度  $1.1\text{gcm}^{-3}$  では、流体ルビジウムは依然として金属である。なぜこの密度を境にルビジウムの正イオン同士が接近し始めるのか、このことが研究期間終了時点での大きな謎であった。この予想外の結果が多体電子論で知られている低密度電子ガスの不安定性と関係することに気がついたのはずっと後のことである。ウイグナー以来、いわゆるジェリウムモデルをもとに多体電子論が発展してきたが、近年の理論の進展と精密化により、電子ガスの密度が減少してゆくとある電子密度で、電子ガスの圧縮率が正から負に転じ、また

その誘電関数も正から負に転じることが明らかにされた。負の圧縮率は外力がなくても自ら収縮し、また負の誘電率をもつ媒質中では同符号の試験電荷の間に引力が働くという通常とは違った状況が生じる（電子ガスの中の一個の電子が占有する球の半径をボーア半径で規格化したパラメータ、いわゆるウイグナー・ザイツ半径  $r_s$  で表すと  $r_s=5.25$  に相当する電子密度のところで不安定性が起きるとされる。多くの金属結晶の電子密度は  $r_s=2\sim 5$  の範囲にあり、不安定性が起きるとされているのはこれよりさらに低密度である。）。我々は、流体ルビジウム中の電子ガス密度を見積もった。その結果、ルビジウムの原子間距離が短縮し始める密度（イオン密度）を電子ガスの密度に換算すると、まさに  $r_s=5.25$  に一致することが判った。このことから、原子間距離の短縮は、電子ガスの誘電率が負に変わったために正イオン間に引力が働き始めたものと考えられる。見方を変えると、我々の実験は、低密度電子ガスの不安定性が実際に起きることをイオンの振る舞いを通してはじめて観測したものであるといえる。結晶金属の大幅な体積膨張が不可能であることを考えてみても分かるように、これまで、低密度電子ガスの不安定挙動は理論的にはあり得ても、現実には起こり得ないことであろうと一般に考えられてきた。あとになってみれば、流体ルビジウムの体積を膨張させることは同時に電子ガス密度を低下させることであるから、流体ルビジウムはこの問題を調べるためには最適の物質であったわけである。この結果は、低密度電子ガスの不安定性（負の誘電率をもつ媒質：低密度電子ガス）が実際に存在するとことを実験的に証拠づけた論文として公表し（PRL 2007）、同時にプレス発表を行った。この論文はレフェリーから非常に高い評価を受け、異例の速さで出版された。この論文のユニークなところは、流体金属の構造研究をこれまでほとんど交流のなかった強相関電子系や超伝導の分野に結び付けた点にある。負の誘電率をもつ低密度電子ガス中では、電子同士の間には引力が働くためフォノンを介さない超伝導の可能性があるという理論的研究や、フォノンを介する通常の超伝導であっても電子系が負の誘電率をもつ場合には超伝導温度が大幅に上昇する可能性があり、室温超伝導実現のためには負の誘電率をもつ電子系の探索が重要であるとの指摘もあり、この論文において負の誘電率をもつ電子ガスが実在するという指摘は大きなインパクトを与えることになった。このように金属流体の構造研究は思いがけない方向に展開してきた。我々としても、低密度電子ガスの不安定性に起因する超伝導が実際にあるかどうかを確かめるために、例えば、低温でアルカリ金属と希ガスとの混合系を作るなどして固体状態での低密度電子状態を実現したいと考えており、科研費申請を行っている。また、これまでは構造を通して電子ガスの不安定挙動を調べてきたが、より直接的に電子状態を調べるために、現在は、後述の科研費により流体ルビジウムを対象にしたコンプトン散乱の測定を SPring-8 において行っている。

## (2) 論文発表、国際会議等への招待講演における発表など

主な論文

1) M. Inui, X. Hong and K. Tamura,

Local structure of expanded fluid mercury using synchrotron radiation: From liquid to dense vapor  
(放射光による低密度流体水銀の局所構造の研究 (X線回折、研究期間中のものであるが参考のため)) ,

Phys. Rev. B, 68 (2003) 094108(1-9).

2) D. Ishikawa, M. Inui, K. Matsuda, K. Tamura, S. Tsutsui and A.Q.R. Baron,

Fast sound in expanded fluid Hg accompanying the metal-nonmetal transition (低密度流体水銀の金属 - 非金属転移に伴う速い音速 (X線非弾性散乱)) ,

Phys. Rev. Lett., **93** (2004) 09780(1-4).

3) M. Inui, K. Matsuda, D. Ishikawa, K. Tamura and Y. Ohishi,

Medium-range fluctuations accompanying the metal-nonmetal transition in expanded fluid Hg (低密度流体水銀の金属 - 非金属転移に伴う中距離のゆらぎ (X線小角散乱)) ,

Phys. Rev. Lett., **98** (2007) 185504(1-4).

4) K. Matsuda, K. Tamura and M. Inui,

Instability of the electron gas in an expanding metal (低密度金属における電子ガスの不安定性 (ルビジウム)) ,

Phys. Rev. Lett., **98** (2007) 096401(1-4).

国際会議招待講演

1) K. Tamura, M. Inui, K. Matsuda and D. Ishikawa,

The metal-nonmetal transition and the structural instability in expanded fluid metals,

The 12<sup>th</sup> international conference on liquid and amorphous metals (LAM12) (Metz, France), 2004.

(分野のコア会議)

2) K. Tamura,

Static and dynamic structure of expanded fluid Hg,

International workshop on neutron Brillouin scattering (Perugia, Italy) 2005.

3) K. Tamura, K. Matsuda and M. Inui,

Structure and electronic properties of expanding fluid metals,

The 13<sup>th</sup> international conference on liquid and amorphous metals (LAM13)(Ekaterinburg, Russia),

2007. (分野のコア会議)

### (3) 研究費の取得状況 (研究代表者として取得しているもののみ)

1) 文部科学省科研費 基盤研究 (A) 平成 16~18 年度 直接経費 28,200 千円

「X線非弾性散乱による超臨界金属流体の原子分子ダイナミクスの解明」

2) 文部科学省科研費 基盤研究 (A) 平成 19~21 年度 直接経費 30,900 千円 (21 年度分

を含む)

「低密度アルカリ金属流体のコンプトン散乱測定 - 電子ガス不安定挙動の解明 - 」

#### (4) 特別推進研究の研究成果を背景に生み出された新たな発見・知見

ありふれた金属である水銀やルビジウムが膨張するときミクロに見てどのように膨張するか、またどのように性質を変えるか、この問題は多くの研究者の興味を惹く共通性の高いテーマであった。しかしながら、技術的に大きな問題があったため、構造研究については長い間手付かずの状態にあった。我々は種々の困難を克服することにより、研究期間を通じて流体金属の体積膨張に伴うミクロ構造を初めて明らかにすることができた。基本データの蓄積、新現象の発見等大きな成果が上がった。それ以後今日まで研究を継続・発展させてきたが、この間に新たに得られた知見を以下に記す。以下の二つは、現象の奥に潜む物理を捉えたものとして特筆すべきものとする。

##### 1) 流体水銀の金属 - 非金属転移は基本的に一次相転移である。

この知見により、水銀の金属 - 非金属転移はバンドの重なりが解けることによって起きるとする従来の考え方が一新された。また、金属 - 非金属転移が一次相転移であり、それがナノスケールの密度ゆらぎの形をとって現れるという見方は、これまで否定されてきたランダウの考えを新たな形で復活させることになった。

##### 2) 低密度電子ガスの不安定性は実在する。

アルカリ金属流体の構造研究によって得られたこの知見は、これまで単に理論的帰結でしかなかった電子ガス不安定性が現実の物質中で実際に発現することを裏付けるものである。このことは物性理論の研究者に大きなインパクトを与えるだけでなく、新たな原理に基づく新規超伝導材料創製のための指針となる。

## 2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況はどうか。

### (1) 学界への貢献の状況

#### 1) 高温高压技術の普及

金属流体の臨界温度・圧力は通常分子性流体に比べて一桁以上高いためこれまで構造研究は手付かずの状態であった。我々が開発したガス圧式高压容器とサファイヤ試料容器を用いることによりそれが世界で初めて可能になった。しかしながら、高压ガスの取り扱いに関する法律のため誰もが手軽に実験できるわけではない。石油コンビナートのガス圧縮装置も実験室で行う極めて小規模の装置も同じ法律に従うため、国の認可を得るためには煩雑な手続きと莫大な費用がかかる。それにもかかわらず、技術は徐々に普及している。例えば、サファイヤ試料容器は開発者の名を冠してタムラセルと呼ばれ広く使用されるようになった。

#### 2) 水銀の結果

水銀は代表的な液体金属である。水銀が膨張し金属から非金属へと電子的性質を変えるとき原子配列がどのように変わるかという問題は、液体金属分野の研究者誰もが抱く共通のテーマであった。この問題を解決したことの学界への貢献度は大きい。いわば、将来教科書に載るほどの重要な成果であると考えられる。流体水銀の基礎データ（各温度、圧力、密度毎の構造因子の数値データ等）はホームページに公開しており、世界各地の研究者によって第一原理シミュレーションや逆モンテカルロシミュレーションなどに利用されている。

### 3) アルカリ金属の結果

流体ルビジウムの構造研究の中で、体積膨張に伴い平均原子間距離が増大しているにもかかわらず実測の原子間距離は短縮するという事実が判明した。このことは、以下に述べるように二つの点で他分野への波及をもたらす結果となった。ひとつは、すでに述べたように金属流体の構造研究が、これまでほとんど交流のなかった強相関電子系や超伝導の分野に自然発生的に結び付いた点である。我々としては原子間距離の短縮が低密度電子ガスの不安定性に関わるとは思ってもいなかったし、逆に多体電子論の専門家は、低密度電子ガスの不安定性を示す物質が現実にあるとは考えていなかったようである。現在、強相関電子系や超伝導の理論家（東大物性研の高田教授、前橋博士ら）による流体アルカリ金属研究が始まっており、これまでにない異分野融合型の展開が期待される。また、電子ガス不安定性起源の新規超伝導物質探索の動きもあり、そのような実験家（京大理の前野教授のグループ）との交流も始まっている。低密度電子ガスの不安定性が架空のものではなく現実に存在するということが、超伝導材料の開発に取り組む研究者にとって有力な指針となる。もうひとつは、間接的ではあるが、金属水素に関わる点である。近年、米国のネリス博士らによる水素分子の爆縮実験により 3000K、140 万気圧という超高温高圧下で、水素が金属（流体金属水素）になることが明らかにされ、水素がアルカリ金属の仲間であることが初めて示された。水素分子の圧縮過程は、本研究におけるアルカリ金属流体の膨張過程のまさに逆のプロセスである。したがって膨張するアルカリ金属の構造研究は、構造実験がほとんど不可能である流体金属水素の構造を知る上で重要な情報提供をすることになる。この意味で、アルカリ金属流体の研究は、木星に関わる研究でもある。木星内部には流体金属水素が存在し、その流動により強い磁場が生じていると考えられている。木星表面の水素分子が中心に向かって圧縮され金属化するとき、深いところで金属化するか浅いところで金属化するかは磁場の起源に関わる問題である。ルビジウムの結果は、水素の金属化プロセスについての重要な情報を提供する。

### (2) 論文引用状況

調査日 2009年1月22日

研究期間中に発表された論文

1) K.Tamura, M.Inui and S.Hosokawa, Energy dispersive x-ray diffraction equipment for fluids at

extreme condition of high pressure and high pressures, Rev.Sci.Instrum. **70** 144-152 (1999). 「1500°C、1500 気圧以上の臨界温度・圧力をもつ超臨界金属流体のX線回折測定を可能にする高圧容器とサファイヤ試料容器の開発についての論文」 53件

- 2) K.Tamura and M.Inui, Structural changes and the metal-nonmetal transition in supercritical fluids, J.Phys.:Condens.Matter, **13** R337-R368 (2001). 「放射光を用いて流体水銀および流体セレンの融点近傍の液体から超臨界領域を経て気体にいたる広い密度領域で行ったX線回折およびX線小角散乱測定結果のまとめと構造と金属-非金属転移の関係を論じた論文」 39件
- 3) M.Inui, X.Hong and K.Tamura, Local structure of expanded fluid mercury using synchrotron radiation: from liquid to dense vapor, Phys. Rev. B, **68** 094108 (1-9) (2003). 「放射光を用いた流体水銀のX線回折測定結果についての論文。液体から金属-非金属転移、超臨界領域を経て気体にいたる広い密度領域での測定結果であり、これまで行ってきたX線回折測定の集大成である。金属-非金属転移に伴って局所構造(配位数や最近接原子間距離)が大きく変化することを指摘し、さらにその原因について論じている。」 16件
- 4) M.Inui, Y.Oh'ishi, I.Nakaso, M.H.Kazi and K.Tamura, Small angle x-ray scattering measurements for fluid Se near the critical point, J.Non-Cryst.Solids, **250-252** 531-536 (1999). 「流体セレンの臨界点近傍における臨界密度ゆらぎをX線小角散乱により初めて観測した論文。」 11件
- 5) X.Hong, T.Matsusaka, M.Inui, D.Ishikawa, M.H.Kazi, K.Tamura, K.Funakoshi and W.Utsumi, X-ray Diffraction Measurements for Expanded Fluid Mercury Using Synchrotron: From Liquid to Dense Vapor, J.Non-Cryst.Solids, **312-314** 284-289 (2002). 「放射光を用いた流体水銀のX線回折測定についての論文」 9件

#### 研究期間終了後に発表された論文

- 6) D. Ishikawa, M. Inui, K. Matsuda, K. Tamura, S. Tsutsui, and A.Q.R. Baron, Fast sound in expanded fluid Hg accompanying the metal-nonmetal transition, Phys. Rev. Lett., **93** (2004) 097801(1-4). 「流体水銀の広い密度範囲で行ったX線非弾性散乱測定の論文。金属-非金属転移領域では、分散関係から得たマイクロな音速が超音波測定によるマクロな音速の3倍にも上るといふ異常な振る舞いを初めて見出した論文である。」 21件
- 7) K. Matsuda, K. Tamura and M. Inui, Instability of the electron gas in an expanding metal, Phys. Rev. Lett., **98** (2007) 096401(1-4). 「流体ルビジウムのX線回折およびX線小角散乱測定により、融点から遠くない金属領域で体積膨張にも関わらず原子間距離が短縮しかつ密度ゆらぎが発生するという異常な振る舞いを初めて観測し、このことが低密度電子ガスの不安定性起源であることを指摘した論文。」 10件
- 8) M. Inui, K. Matsuda, D. Ishikawa, K. Tamura and Y. Ohishi, Medium-range fluctuations Accompanying the Metal-Nonmetal transition in Expanded Fluid Hg, Phys. Rev. Lett., **98** (2007)

185504(1-4). 「流体水銀の X 線小角散乱を行い、金属 - 非金属転移に由来する 1 ナノスケールの密度ゆらぎが存在することを初めて見出した。このゆらぎを手がかりにして、水銀の金属 - 非金属転移が基本的に一次相転移であることを指摘した論文である。」 6 件

9) K. Matsuda, K. Tamura, M. Katoh and M. Inui, Molybdenum cell for x-ray diffraction measurements of fluid alkali metals at high temperatures and high pressures, *Rev. Sci. Instrum.*, **75** (2004) 709-712. 「極めて強い反応性をもつ流体アルカリ金属を高温高压下で安定に保持し、X線回折測定を可能にするモリブデン試料容器の開発についての論文である。」 5 件

10) D. Ishikawa, M. Inui, K. Matsuda, and K. Tamura, Collective dynamics in dense Hg vapour, *J. Phys.: Condens. Matter*, **16** (2004) L45-L50. 「放射光を用いた水銀高密度気体の X 線非弾性散乱測定の結果についての論文」 5 件

### 3. その他、効果・効用等の評価に関する情報。

#### (1) 研究成果の社会への還元状況

流体ルビジウムの研究成果 (Instability of the electron gas in an expanding metal, *Phys. Rev. Lett.*, 2007) についてプレス発表を行い、朝日新聞 (H19.2.23.朝刊 2 面)、日刊工業新聞 (H19.2.23. 26 面)、京都新聞 (H19.2.23. 朝刊 29 面) などに記事が掲載された。基礎物理学の内容であるにもかかわらず大きな反響があり、非専門家を含めた様々な方々から問い合わせがあった。例えば、「プラス電荷同士が引き合うという奇妙な振る舞いはコロイド化学でも見られる現象である。その現象の発見当時は誰にも信用してもらえず、最近になってようやく市民権を得るようになった。分野が異なっても同様な現象があるというのは興味深く心強い。」というコロイド化学の大御所からわざわざコメントをいただいたこともある。プラス同士が引き合うことの初等理科教育への影響についてのコメントもあった。このようなことを通して社会貢献の一翼を担うことができたのではないかと考えている。一方、材料開発という点に関しては、低密度電子ガスの不安定性 (負の誘電率をもつ電子ガス) にもとづいた超伝導物質について、その存在はまだ数多くは確認されていないが、この方向での新規超伝導物質の探索が始まっているのは確かである。最近、前野教授のグループが見つけた超伝導物質  $\text{Ag}_5\text{Pb}_2\text{O}_6$  (PRB 2005) はその実例である。また、立木昌先生 (超電導 Web21 2006) が指摘されているように、高温超伝導を実現するためには低密度電子系に着目することは非常に重要である。我々にとってもこの指針にもとづいた超伝導材料の開発は大変魅力的である。我々は、これまでどちらかといえば高温での研究を行ってきたので、これから縁の薄かった低温の世界、超伝導分野に足を踏み入れるのは勇気とエネルギーの要ることであるが、先に述べたようにアルカリ金属と希ガスの混合系を作ることにより固体の中に低密度電子系を実現して超伝導を調べたいと考えている。世界的にみて、どのような成果が出てくるかは未知数であるが、この方向での研究は大きく発展す

るであろう。流体アルカリ金属の研究がその布石となったことは間違いない。

また、流体水銀の研究成果 (Medium-range fluctuations Accompanying the Metal-Nonmetal transition in Expanded Fluid Hg, Phys. Rev. Lett., 2007) についてもプレス発表を行い、日刊工業新聞 (H19.2.23, 20 面) に掲載された。

## (2) 研究計画に参与した若手研究者の成長の状況

本研究計画には数多くの大学院生が参画したが、そのうちの大部分は修士課程終了後企業に就職しそれぞれの分野で研究あるいは技術開発に携わっている。以下には、研究期間中博士課程に在学しかつ学位取得後も関連する研究を継続してきた者およびPD研究者について紹介する。

### 松田和博

京都大学大学院博士課程以来、アルカリ金属流体の構造研究を行い、本特別推進研究に大いに貢献した。日本学術振興会特別研究員(D2)を経て、当研究室(京都大学工学研究科材料工学専攻)の助手(助教)を務め、平成21年4月より准教授(京都大学理学研究科物理学専攻)。この間、博士論文「低密度流体ルビジウムの静的構造に関する研究」で博士(工学)の学位取得。

### 石川大介

京都大学大学院博士課程においてX線非弾性散乱による流体水銀のダイナミクスの研究を行い、本特別推進研究に大いに貢献した。理化学研究所基礎特別研究員を経て、現在同播磨研究所研究員。SPring-8の放射光を用いたX線非弾性散乱ダイナミクス研究の専門家として活躍。この間、博士論文「高分解能X線非弾性散乱法を用いた低密度水銀流体の動的構造研究」で博士(工学)の学位取得。

### Moynul Huq Kazi

バングラデシュからの留学生。広島大学大学院博士課程在学期間中、放射光を用いた流体セレンのX線小角散乱測定を行った。博士論文「A study of density fluctuations in supercritical fluid selenium by small angle x-ray scattering measurements」で博士(学術)の学位取得。

### Xinguo Hong

日本学術振興会外国人特別研究員として当研究室に滞在。SPring-8の放射光を用いて流体水銀およびセレンのX線回折、X線小角散乱測定を行った。中国北京の放射光施設 BSRF 研究員。