

平成 22 年 5 月 20 日現在

研究種目：基盤研究（A）  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19204040  
 研究課題名（和文） 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  
 研究課題名（英文） Compton Scattering Measurements for Expanded Fluid Alkali Metals:  
 Studies on the Instability of the Low-density Electron Gas  
 研究代表者  
 田村 剛三郎（TAMURA KOZABURO）  
 京都大学・工学研究科・名誉教授  
 研究者番号：30155262

研究成果の概要（和文）：ウイグナー以来発展してきた多体電子論の予測では、電子ガスが低密度になると、ある密度で誘電率が負になり、その中に置かれた同種電荷++あるいは--が引き合うという奇妙な状況が現れるとされる。しかしその実在性については長く疑問視されてきた。我々は、この問題を解明するため、超臨界流体ルビジウムを用いて電子ガスの低密度化を実現し、電子の振る舞いの直接観測が可能なコンプトン散乱測定を行った。その結果、まさに電子ガス不安定性の生じる理論予測密度で、自由電子モデルからの逸脱が明瞭に観測された。

研究成果の概要（英文）：Many-electron theory since Wigner's pioneering work has predicted that interacting electron gas suffers a negative compressibility and the static dielectric-function (DF) becomes negative when electron density is sufficiently reduced. However, a problem has remained unsolved as to whether the low-density electron gas with negative DF really exists or not. To clarify it we have measured Compton scattering for fluid rubidium with reducing density of electron gas. It was clearly observed that the Compton profile deviates from the free-electron model at the theoretically predicted electron-density.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	20,700,000	6,210,000	26,910,000
2008年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
2009年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
年度			
年度			
総計	30,900,000	9,270,000	40,170,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・数理物理・物性基礎

キーワード：超臨界金属流体、アルカリ金属、低密度電子ガス、コンプトン散乱、放射光

## 1. 研究開始当初の背景

近年、多体電子論の発展と精密化により、低密度電子ガスに新たな不安定挙動が現れることが明らかになった。電子密度の減少は、

電子1個あたりの占有体積の半径をボーア半径で規格化した、いわゆるウイグナーザイツ電子半径  $r_s$  の増大として表現されるが、ちょうど  $r_s = 5.25$  のところで、電子ガスの圧縮率

が大きな正の値から大きな負の値へ転ずることが判明した。圧縮率が負であることは、外力が無くとも自ら縮むということであり、電子ガスが熱力学的に不安定になることを意味する。また、圧縮率が負になると、総和則の結果として、電子ガスの静的誘電関数（長波長極限）もまた負になる。誘電関数が負の媒質中では、正であれ負であれ、同符号の試験電荷の間に引力が働き、通常とは全く違った状況が生じる。 $r_s \geq 5.25$ の低密度領域では電子同士の間引力が働くという奇妙なことが起きる。

電子ガス不安定挙動の問題は、いわゆるジェリウムモデルすなわち一様な正電荷を背景とした電子ガスを対象として理論的に取り扱われてきた。このモデルでは正電荷が固定されているため、電子系の不安定性が、ただちに正電荷も含めた全体系の不安定性を引き起すものではない。また、正電荷の局在化やゆらぎを許容した場合についても多くの議論がなされてきたが、不安定挙動が実在するかどうかについては賛否両論があり、定説は無い。実験の立場からは、そもそも電子系の密度をいかにして減少させるかという現実的な問題がある。通常の金属結晶の場合、 $r_s$ は2~4、5程度であるから、何らかの方法で金属結晶の体積を大きく膨張させることができれば、 $r_s \geq 5.25$ までの低密度化が可能に思えるが、実際問題としては難しい。このように、電子ガス全体が引力的になり自発的収縮が起きるといふ不思議な挙動（熱力学的・静電的不安定性）は、理論的にあり得るとしても実際にその存在を確かめる術のない非現実的なものであるという考え方がこれまで支配的であった。

結晶から目を転じ、金属流体を考えると事情は変わる。液体に圧力をかけ沸騰を抑えながら温度を上げてゆくと、融点から液体・気体超臨界領域、さらに気体に至るまで密度を連続的かつ大幅に減少させることが可能である。このことは同時に、電子密度を連続的かつ大幅に減少させることになる。すなわち、金属流体を用いることにより電子ガス不安定挙動の研究が可能になる。

研究代表者らは、平成11年から15年まで、文科省科研費・特別推進研究：「放射光を用いた超臨界金属流体の静的・動的構造の解明」を進めてきた[1]。特別推進研究では、研究代表者らが独自に開発した高温高压実験技術をベースとし、大型放射光施設 SPring-8 を利用することにより、水銀やアルカリ金属などの超臨界金属流体を対象として（1）X線回折測定により短・中距離構造、（2）X線小角散乱測定により密度のゆらぎ等の長距離構造、さらに（3）X線非弾性散乱測定により動的構造について研究を行ってきた。その中で、膨張してゆく流体ルビジウムのミ

クロ構造に極めて特異な変化が現れることが分かった。すなわち、体積膨張と共に平均原子間距離が増大しているにも関わらず、ある密度以下になると最近接原子間距離が逆に短縮するという予期しない振る舞いがX線回折測定から明らかになった[2]。このことは、ルビジウムイオン間に引力が新たに発生したことを物語る。興味深いことに、最近接原子間距離の短縮が始まる密度は、低密度電子ガスの圧縮率が負になる密度（ $r_s = 5.25$ ）に一致することが明らかになった。このことは、マイクロ構造の変化が電子ガスの不安定性を起源とするものであることを意味する。ルビジウムイオン間に引力が働くようになったのは、電子ガスの誘電関数が負になったことによるものと考えられる。さらに、X線小角散乱によりこの密度領域（ $r_s = 5.25$ ）において相関長が5Å程度の弱い密度ゆらぎが発生すること、X線非弾性散乱により分散関係の異常が現れることを確認した[3]。このように、我々の実験は、流体ルビジウム中のイオンをプローブとして、低密度電子ガスの不安定挙動を初めて捉えたものと考えられる。

[1] 特別推進研究 (H11-15) 研究成果報告書  
「放射光を用いた超臨界金属流体の静的・動的構造の解明」

[2] K.Matsuda, K.Tamura and M.Inui, Phys. Rev. Lett., **98** (2007) 09640181-4).

[3] 基盤研究 (A) (H16-18) 研究成果報告書  
「X線非弾性散乱による超臨界アルカリ金属流体の原子分子ダイナミクス解明」

## 2. 研究の目的

本研究では、電子ガスの不安定挙動を直接見るために、流体ルビジウムを対象として、コンプトン散乱により電子運動量密度分布を測定する。一価のアルカリ金属、ルビジウムは最も単純な金属のひとつであり、価電子は球対称のフェルミ面をもち自由電子ガスとして振る舞う。さらに、臨界温度と臨界圧力は1744°C、124.5barであり、実験室レベルでの実験が可能である。融点から不安定挙動が起きる密度領域を経て、金属-絶縁体転移の起きる臨界点近傍、さらに気体領域に至るまで、広い密度範囲で測定を行う。特に、電子ガスの不安定挙動が電子運動量密度分布に自由電子からのずれとしてどのように現れるかに着目する。コンプトン散乱用の高温高压容器を新たに製作し、SPring-8において実験を行う。

## 3. 研究の方法

低密度化に伴う電子状態の変化を調べるために、アルカリ金属流体ルビジウムのコンプトン散乱測定を実施した。

最初に、流体ルビジウムの超臨界条件下に

おけるコンプトン散乱測定が可能な高压容器およびモリブデン試料容器の開発を行った。図1は、作製した内熱型の高压容器を示す。2173 K (1900°C)、25 MPa までの高温高压下でコンプトン散乱実験を行うことが可能である。側面図を図1(a)に示す。高压容

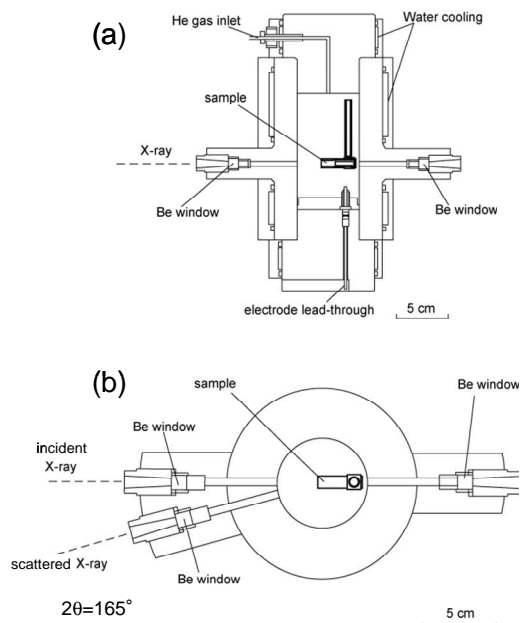


図1(a) 高压容器の側面図、(b)高压容器の断面図

器は、上下のフランジとシリンダーから成る。試料は、高压容器中央部のモリブデン試料容器に入れる。図1(b)は、高压容器の断面図を示す。高压容器の左側にある入射X線のベリリウム窓から入射したX線は、流体試料により散乱され、散乱角165度の位置に設けたベリリウム窓より取り出される。X線窓として用いた金属ベリリウムのサイズは10 mm厚、10 mm径であり、圧力シールが施されている。また、圧力媒体にはX線吸収係数の小さいヘリウムガスを用いた。これらの高温高压技術とSPRING-8の放射光を利用することにより、流体ルビジウムのコンプトン散乱実験が初めて可能になった。

散乱実験はBL08Wの高分解能コンプトン散乱測定装置を用いて行った。スペクトロメータとしては、Cauchy型アナライザ結晶と位置検出器からなる標準的な仕様を用いた。位置検出器としてX線イメージンシファイアカメラを使用した。115.6keVの高エネルギーX線を入射X線として利用し、70keV~90keVの散乱X線を検出した。サンプルステージに高压容器を設置し、位置調整を行った。最初に、エネルギー校正用にTl-Bi粉末の標準試料をセットし、蛍光測定を行った。次に、予め現有のグローブボックスの中でルビジウム試料を入れたモリブデン試料容器を高压容器に密封し、SPRING-8のビーム

ラインに搬入、所定の位置にセットした。ガス圧縮機で高純度ヘリウムガスによる試料への圧力を行い、温度調節器を用いて昇温を行った。このようにして、ルビジウムの融点近傍の60°C・5 barから臨界点(1744°C, 124.5 bar)を越える1850°C・137 barまでのコンプトン散乱測定に世界で初めて成功した。

データ解析は以下の手順で行った。まず、Tl-Bi粉末の蛍光測定データを用いてエネルギーの校正を行い、その後、バックグラウンド補正、試料による吸収補正、散乱断面積補正、エネルギー・運動量変換、検出器系の感度補正を行った。最後に、スペクトルの折り返し平均と全電荷数による規格化を行い、流体ルビジウムの電子運動量密度分布(コンプトンプロファイル)を導出した。

#### 4. 研究成果

図2は、得られた流体ルビジウムのコンプトンプロファイルを示す。代表例として、60°C、1000°C、1600°Cのものを示してある。

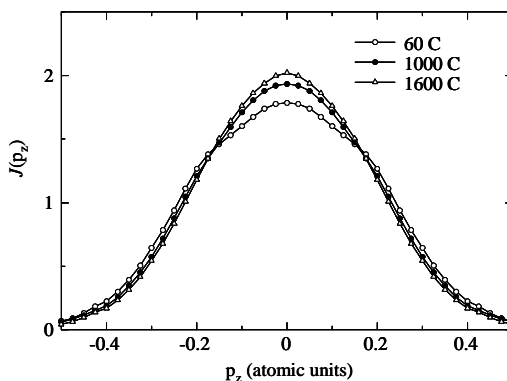


図2 流体ルビジウムの価電子運動量密度分布

低密度化に伴い中央のピークが徐々に細くなってゆくことが分かる。図3は、価電子のコンプトンプロファイルから得たフェルミ運動量の密度依存性を示す。フェルミ運動量を導出するにあたり、フーリエ変換により求める方法[1]を採用した。融点近傍の60°Cから流体密度1.1 gcm<sup>-3</sup> ( $r_s = 5.25$ に相当)の1000°C付近まで、フェルミ運動量は電子数密

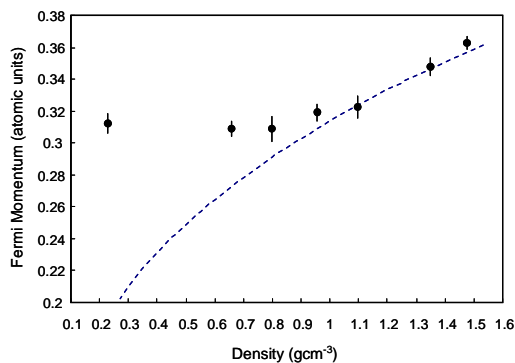


図3 フェルミ運動量の密度変化

度の  $1/3$  乗に比例して低下する傾向を示しており、電子ガスモデルから予想される通り、自由電子的挙動を示している。それに対して、 $1000^{\circ}\text{C}$  以上、すなわち流体密度が  $1.1 \text{ gcm}^{-3}$  以下 ( $r_s \geq 5.25$ ) になると、フェルミ運動量の低下が緩慢となり、フェルミ運動量の値は  $0.32 \text{ a.u.}$  付近のほぼ一定値にとどまる傾向を示すことが明らかになった。

自由電子的挙動を示す電子ガスのコンプトンプロファイルは、球形のフェルミ球を反映して、放物線の形をとる。流体ルビジウムの価電子プロファイルが自由電子的プロファイルとどのように違っているかを調べるために、運動量範囲  $0.3 \sim 0.3 \text{ a.u.}$  で放物線によるフィッティングを行った。フィッティン

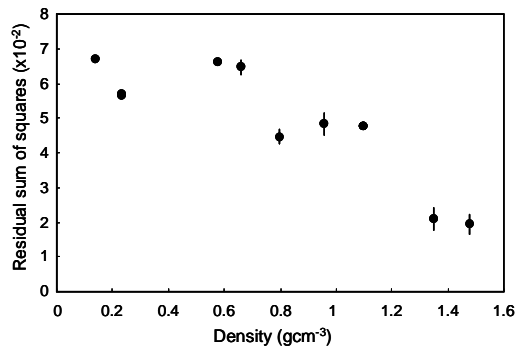


図4 残差二乗和の密度変化

グの残差二乗和の密度依存性を図 4 に示す。密度の低下に伴い、 $1 \text{ gcm}^{-3}$  付近で残差が増大する傾向が見られる。このことは、電子の運動量分布そのものがこの密度を境にして自由電子的でなくなることを意味し、図 3 に示したフェルミ運動量の密度依存性と符合する。

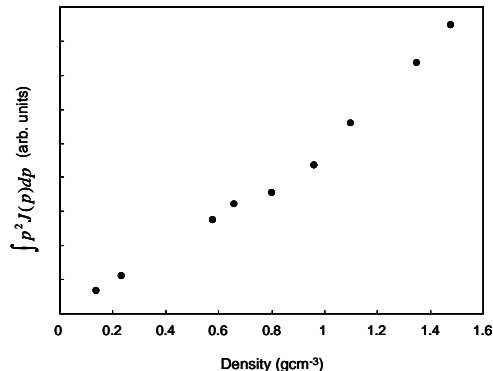


図5 二次のモーメントの密度変化

図 5 は、コンプトンプロファイルに運動量の二乗を乗じて積分した値、すなわち二次のモーメントを示す。二次のモーメントの値は、電子系の運動エネルギーの期待値に比例する[2]。この密度依存性を見ると、流体密度の低下(すなわち伝導電子密度の低下)に伴い、ほぼ直線的に減少するが、 $1.1 \text{ gcm}^{-3}$  付近から

低下挙動が緩慢になる傾向があり、クロスオーバーの存在が推察される。電子ガス系における運動エネルギーとフェルミエネルギーとの間に比例関係があることを踏まえると、運動エネルギーの期待値が緩慢になる傾向は、図 3 のフェルミ運動量の挙動とも符合する。

すでに述べたように、電子ガス理論によれば、この密度領域 ( $r_s = 5.25$  に相当) で圧縮率が発散するという不安定性が予測されている。圧縮率不安定性は、また、電子系が自ら相分離を起こす可能性のあることを示唆する。我々がこれまでにやってきたアルカリ金属流体の構造実験の結果から、この密度領域で、ミクロな不均質構造が出現することが示された。この結果を踏まえると、本測定で得られたフェルミ運動量および電子系の運動エネルギーの密度依存性は、低密度化した流体ルビジウム中の電子集団に、例えば、ミクロスコピックに伝導電子密度を維持し、フェルミ運動量の低下を抑制しようとする不安定化回避挙動、すなわち電子系に不均質構造が発生していることが強く推測される。

本研究は、低密度電子ガスの不安定挙動を解明するため、価電子の振る舞いをフェルミ面近傍だけでなく運動量分布全体として観測した初めての実験である。上述のように、電子系自身の密度を連続的に変えながら、自由電子的挙動がどの時点で破綻するか、それがどのように起きるかを目の当たりにすることができた。我々がこれまでに観測したイオン系の奇妙な振る舞いも、電子系に原因があるとして理解できる。このように、これまでにやってきたイオン系と電子系両方の研究によって、低密度電子ガスの不安定性が、架空のものではなく、現実に存在することが明らかになった。

本研究は、放射光科学研究センター (JASRI) の櫻井吉晴、伊藤真義両博士、広島大学の梶原行夫博士の協力を得て行われた。(株)アライドマテリアルの加藤昌宏氏にはモリブデンセル製作の際大変お世話になった。現在、本研究成果についての論文を準備中である。また、研究分担者松田が、本年 7 月に開催の第 14 回液体およびアモルファス金属国際会議で招待講演として成果を発表する。

[1] P. Pattison, and B. Williams, Solid State Comm., 20 585-588 (1976).

[2] M.J. Cooper, P.E. Mijnarends, N. Shiotani, N. Sakai, A. Bansil, eds.: X-ray Compton Scattering, Oxford Series on Synchrotron Radiation, Oxford Univ. Pr., 2004.

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕 (計 20 件)

- ① M.Inui, K.Maruyama, K.Kajiwara and M.Nakada, Icosahedral ordering in liquid iron studied via x-ray scattering and Monte Carlo simulations, *Phys. Rev. B*, **80** (2009) 180201(1-4), 査読有.
- ② S.Hosokawa, M.Inui, Y.Kajiwara, K.Matsuda, et al., Transverse Acoustic Excitation in liquid Ga, *Phys. Rev. Lett.*, **102** (2009) 105502(1-4), 査読有.
- ③ K.Kajiwara, M.Inui, K.Matsuda and K.Tamura, Small-angle x-ray scattering of supercritical fluid Hg: Bi-impurity effect, *J. Phys: Conf. Series*, **98** (2008) 012002(1-4), 査読有.
- ④ K.Matsuda, S.Naruse, K.Hayashi, K.Tamura, M.Inui and Y.Kajiwara, Structural studies of expanded fluid cesium, *J. Phys: Conf. Series*, **98** (2008) 012003(1-4), 査読有.
- ⑤ M.Inui, Y.Azumi, S.Hosokawa, Y.Kajiwara, K.Matsuda and K.Tamura, X-ray diffraction measurements of expanded fluid sulfur up to the supercritical region, *J. Phys: Conf. Series*, **98** (2008) 012008(1-4), 査読有.
- ⑥ M.Inui, K.Matsuda, D.Ishikawa, Y.Kajiwara and K.Tamura, Structural fluctuations in expanded fluid Se accompanying the semiconductor-metal transition, *J. Phys: Conf. Series*, **98** (2008) 012028(1-4), 査読有.
- ⑦ M.Inui, D.Ishikawa, K.Matsuda, K.Tamura and A.Q.R. Baron, Experimental techniques at high-resolution inelastic x-ray scattering measurements for supercritical metallic fluids at high temperatures and high pressures using synchrotron radiation at SPring-8, *Codensed Matter Physics*, **11** (2008) 83-93, 査読有.
- ⑧ K.Tamura, K.Matsuda and M.Inui, Structural and electronic properties of expanding fluid metals, *J.Phys.: Condens. Matter*, **20** (2008) 114102(1-6), 査読有.
- ⑨ A.Harada, F.Shimojo and K.Hoshino, Structural and electronic properties of liquid carbon: *ab initio* molecular-dynamics simulation, *J. Phys: Conf. Series*, **98** (2008) 042014(1-4), 査読有.
- ⑩ 松田和博, 田村剛三郎, 低密度アルカリ金属流体の構造研究, *高圧力の科学と技術*, **18** (2008) 313-320, 査読有.
- ⑪ 乾雅祝, 石川大介, 田村剛三郎, 金属-非金属転移を伴う超臨界流体水銀の静的・動的構造研究, *高圧力の科学と技術*, **18** (2008) 321-327, 査読有.
- ⑫ 田村剛三郎, 松田和博, 負の誘電率をもつ電子ガス - 超伝導材料創製への未来展望 -, *未来材料*, **8** (2008) 50-56, 査読無.
- ⑬ 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),

- ⑭ K.Tamura, M.Inui, K.Matsuda and D.Ishikawa, Structural instability and metal-non-metal transition in expanded fluid metals, *J. Non-Cryst. Solids*, **353** (2007) 3348-3357, 査読有.
- ⑮ K.Matsuda, M.Inui, M.Kusakari and K.Tamura, X-ray diffraction studies of fluid rubidium: From the liquid to a dense vapor, *J. Non-Cryst. Solids*, **353** (2007) 3380-3383, 査読有.
- ⑯ M.Inui, K.Sato, K.Mifune, K.Matsuda, D.Ishikawa and K.Tamura, Wide and small angle x-ray scattering measurements for expanded fluid Se accompanying the semiconductor-metal and metal-non-metal transition, *J. Non-Cryst. Solids*, **353** (2007) 3371-3375, 査読有.
- ⑰ Y.Sakaguchi and K.Tamura, A possibility of the photo-induced semiconductor-metal transition in liquid selenium, *J. Non-Cryst. Solids*, **353** (2007) 3366-3370, 査読有.
- ⑱ Y.Naito, M.Inui, T.Anai and K.Tamura, X-ray diffraction measurements for liquid Ge-Si alloys using synchrotron radiation, *J. Non-Cryst. Solids*, **353** (2007) 3376-3379, 査読有.
- ⑲ F. Shimojo, M. Aniya, K.Hoshino and Y. Zempo, Structure of fluid Rb: *Ab initio* molecular-dynamics simulations, *J. Non-Cryst. Solids*, **353** (2007) 3492-3494, 査読有.
- ⑳ K.Hoshino, S.Tanaka and F.Shimojo, Dynamical structure of fluid mercury: Molecular-dynamics simulations, *J. Non-Cryst. Solids*, **353** (2007) 3389-3393, 査読有.

〔学会発表〕 (計 19 件)

- ① 長尾武奈、松田和博、乾雅祝、梶原行夫、中村惇平、田村剛三郎、八尾誠、伊藤真義、櫻井吉晴、液体シリコンのコンプトン散乱、日本物理学会、2010年3月22日、岡山大学.
- ② 乾雅祝、梶原行夫、松田和博、細川伸也、八尾誠、石川大介、筒井智嗣、アルフレッド・バロン、高温高压下における液体 As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> の非弾性 X 線散乱測定、日本物理学会、2010年3月22日、岡山大学.
- ③ 細川伸也、乾雅祝、松田和博、梶原行夫、大政義典、他 4 名、熔融 NaI の光学モード、日本物理学会、2010年3月23日、岡山大学.
- ④ 梶原行夫、乾雅祝、松田和博、ゆらぎに着目した液体研究、日本放射光学会、2010年1月8日、イーグレ姫路.
- ⑤ 細川伸也、乾雅祝、梶原行夫、松田和博、熔融 NaI の光学フォノンモード、日本放射光学会、2010年1月8日、イーグレ姫路.
- ⑥ 松田和博、液体ルビジウムのコンプトン散乱測定、スピン・電子運動量密度研究会、2010年1月6日、姫路市民会館.
- ⑦ 梶原行夫、石川大介、乾雅祝、松田和博、A. Q. R. Baron、超臨界水の非弾性 X 線散乱、

日本物理学会、2009年9月27日、熊本大学。  
⑧荻田克美、荒井隆、R. McGreevy、乾雅祝、松田和博、田村剛三郎、マルチスケール逆モンテカルロ法による小角X線散乱データの構造解析、日本物理学会、2009年9月27日、熊本大学。  
⑨ Y. Kajiwara, M. Inui, K. Matsuda and Y. Tomita, Small angle x-ray scattering and density measurements of liquid Se<sub>50</sub>Te<sub>50</sub> mixture at high temperatures and high pressures using synchrotron radiation, Int. Conf. on High Pressure Science and Technology, 2009年7月30日、東京(台場)。  
⑩ M. Inui, Y. Kajiwara, Y. Azumi, K. Matsuda and K. Tamura, Wide and small angle x-ray scattering measurements of supercritical water using synchrotron radiation, Int. Conf. on High Pressure Science and Technology, 2009年7月30日、東京(台場)。  
⑪ 乾雅祝、細川伸也、梶原行夫、松田和博、安住康志、田村剛三郎、放射光を利用した超臨界流体イオウのX線回折ならびにX線小角散乱測定、日本物理学会、2009年3月29日、立教大学。  
⑫ 松田和博、乾雅祝、梶原行夫、田村剛三郎、伊藤真義、櫻井吉晴、液体ルビジウムのコンプトン散乱測定、日本放射光学会、2009年1月12日、東京。  
⑬ K. Matsuda, M. Inui, Y. Kajiwara and K. Tamura, Structural studies of expanded fluid alkali metals, XXI Congress and General Assembly of the International Union of Crystallography, 2008, August 26<sup>th</sup>, Osaka, Japan。  
⑭ 松田和博、乾雅祝、梶原行夫、田村剛三郎、伊藤真義、櫻井吉晴、液体ルビジウムのコンプトン散乱測定、日本物理学会、2008年9月23日、岩手大学。  
⑮ 松田和博、乾雅祝、梶原行夫、成瀬聖、林健太郎、田村剛三郎、筒井智嗣、A. Q. R. Baron、流体ルビジウムの高分解能非弾性散乱実験Ⅲ、日本物理学会、2008年3月26日、近畿大学。  
⑯ 松田和博、乾雅祝、成瀬聖、林健太郎、梶原行夫、安住康志、田村剛三郎、低密度流体セシウムの構造研究、日本高圧力学会、2007年11月22日、倉吉パークスクエア。  
⑰ 松田和博、乾雅祝、成瀬聖、林健太郎、梶原行夫、田村剛三郎、低密度アルカリ金属流体のミクロ構造研究、日本金属学会、2007年9月20日、岐阜大学。  
⑱ 松田和博、乾雅祝、成瀬聖、林健太郎、梶原行夫、田村剛三郎、低密度アルカリ金属流体のミクロ構造研究、日本物理学会、2007年9月21日、北海道大学。  
⑲ 田村剛三郎、超臨界金属流体の構造 - もうひとつのゆらぎ -、日本物理学会、2007年9

月22日、北海道大学。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田村 剛三郎 (TAMURA KOZABURO)  
京都大学・工学研究科・名誉教授  
研究者番号：30155262

### (2) 研究分担者

松田 和博 (MATSUDA KAZUHIRO)  
京都大学・理学研究科・准教授  
研究者番号：50362447

### (3) 連携研究者

乾 雅祝 (INUI MASANORI)  
広島大学・総合科学研究科・教授  
研究者番号：40213136

星野 公三 (HOSHINO KOZO)

広島大学・総合科学研究科・教授  
研究者番号：30134951