

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2008～2010

課題番号：20244061

研究課題名(和文) 高分解能非弾性X線散乱法を利用した超臨界金属流体の特異な動的挙動の解明

研究課題名(英文) Studies on anomalous dynamic properties in supercritical metallic fluids using a high-resolution inelastic x-ray scattering technique

研究代表者

乾 雅祝 (INUI MASANORI)

広島大学・大学院総合科学研究科・教授

研究者番号：40213136

研究成果の概要(和文)：

孤立原子が凝集して金属になる過程を理解するため、高温高圧下で体積を膨張させた流体水銀や流体  $\text{As}_2\text{Se}_3$  などの金属流体を対象に高分解能非弾性X線散乱測定を行い、原子、分子のダイナミクスを調べた。またX線回折とX線小角散乱実験を行い、原子間相互作用や中距離相関に関する知見を得た。これらの結果から、原子が個別運動するか集団運動するかで、伝導電子の役割が変化することが明らかになってきた。

研究成果の概要(英文)：

To understand the condensation process from isolated atoms to a metal, we have investigated atomic dynamics in supercritical metallic fluids at high temperatures and high pressures, such as fluid Hg and fluid  $\text{As}_2\text{Se}_3$ , using a high-resolution inelastic x-ray scattering technique. In addition, we have obtained information on the interatomic interaction and medium-range correlation by large- and small-angle x-ray scattering measurements. From these results, it has been clarified that conduction electrons play different roles for individual and collective dynamics of atoms.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	19,400,000	5,820,000	25,220,000
2009年度	5,600,000	1,680,000	7,280,000
2010年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
年度			
年度			
総計	31,300,000	9,390,000	40,690,000

研究分野：金属・半導体物性

科研費の分科・細目：物理学・数理物理・物性基礎

キーワード：金属-非金属転移、超臨界流体、動的構造、静的構造、構造物性、液体金属、熔融塩

## 1. 研究開始当初の背景

気-液臨界点を迂回して連続的な体積膨張をさせることにより、金属流体の金属-絶縁体転移の詳細を観測することが可能である。常温常圧で密度  $13.6 \text{ g cm}^{-3}$  の水銀は、高温高圧下で密度  $9 \text{ g cm}^{-3}$  まで体積膨張すると絶縁体に転移する(水銀の臨界温度は  $1478 \text{ }^\circ\text{C}$ 、臨界圧力は  $167.3 \text{ MPa}$ 、臨界密度は  $5.8 \text{ g}$

$\text{cm}^{-3}$ )。石川らは臨界点近傍まで体積膨張した高温高圧下の流体水銀について、高分解能非弾性X線散乱測定を行い、動的構造因子  $S(Q, \omega)$  の  $\omega-Q$  分散関係を求めた結果、金属-非金属転移領域において、THz領域の動的音速が超音波測定で得られたMHz領域の音速に比べて3倍速いという特異な現象を見出した(Phys.Rev.Lett. **93** 097801 (2004))。

さらに密度が低下して絶縁体領域に入ると、THz領域の音速は急激に減速しMHz領域の音速に一致する。さらに乾らは、膨張した流体水銀について精密なX線小角散乱実験を行い、金属-非金属転移領域に出現する1ナノメートルのスケールのゆらぎを初めて観測した(Phys.Rev.Lett. **98** 185504 (2007))。

## 2. 研究の目的

流体水銀の金属-非金属転移領域で観測された特異な動的音速と1ナノメートルのスケールのゆらぎとの関係は依然として謎のままである。本研究ではこれらの問題を解明するため、

- (1) 膨張した金属流体の動的構造因子  $S(Q, \omega)$  の測定例の蓄積
- (2)  $S(Q, \omega)$  のより詳細な  $Q$ 、 $\omega$  依存性、ならびに温度・圧力依存性を調べることの2つを目標に新しく高压容器を製作し、連続的な  $Q$  に対して (財) 高輝度光科学研究センター (SPring-8) の放射光を光源に非弾性X線散乱を行って精密な  $S(Q, \omega)$  を測定する。高温高压下で半導体-金属転移を起こす流体セレン、流体  $\text{As}_2\text{Se}_3$ 、分子性絶縁体流体であるイオウ、金属流体である水銀などが研究対象である。さらに SPring-8 の放射光を利用して、X線回折とX線小角散乱実験を合わせて行い、静的・動的構造の統一的理解を目指す。

## 3. 研究の方法

1980年代に田村、細川が開発した高温高压技術とサファイア製試料容器をベースに SPring-8 の高輝度放射光によってのみ実現可能な高分解能非弾性X線散乱技術を組み合わせで行う。石川ら(2004)の研究で用いられた高温高压容器は水銀の超臨界状態を調べるため、常用圧力 196 MPa の条件を達成するように製作された。このためX線を通す窓が小さく、連続的な  $Q$  に対して非弾性散乱スペクトルを測定することができない。本研究では常用圧力 25 MPa の新しい高温高压容器を製作し SPring-8 に設置した。常用圧力を下げたことにより大きなX線窓を装着することができ、新しい容器を用いると、1700°C、25 MPa までの高温高压下、エネルギー分解能 1.5 meV の条件で  $1.5 < Q < 38 \text{ nm}^{-1}$  の連続的な  $Q$  領域の非弾性X線散乱スペクトルが測定できる。短・中距離構造を観測できるX線回折ならびにX線小角散乱実験は、SPring-8 に既設の高温高压容器を用いて行った。実験的な研究と並行して、本研究と関連した課題についてコンピューターシミュレーションなどを利用した理論的な研究が行われた。

## 4. 研究成果

### (1) 個別の成果

#### ① 流体 $\text{As}_2\text{Se}_3$ の動的構造

加圧して沸騰を抑制しながら温度を上昇させると約 1000°C で半導体から金属に転移することが知られている流体  $\text{As}_2\text{Se}_3$  の高分解能非弾性X線散乱実験を 500°C から 1400°C の温度範囲で行い、 $S(Q, \omega)$  を観測することに成功した。減衰振動子モデルを適用して散乱ベクトルの大きさ  $Q$  が  $2 \text{ nm}^{-1}$  から  $9 \text{ nm}^{-1}$  の範囲の音響モードの励起エネルギーを求めた。 $\omega-Q$  分散関係から得られた半導体領域の動的音速は、超音波測定から得られる断熱音速より 1.8 倍速いことがわかった。温度が上昇して半導体-金属転移領域に近づくと  $2 \text{ nm}^{-1}$  の動的音速は断熱音速に近い値をとる。一方、 $Q \geq 3 \text{ nm}^{-1}$  の動的音速は大きな値を保ち、1000°C の半導体-金属転移領域では断熱音速より約 2.5 倍大きな値になる。さらに温度が上昇した金属領域では  $Q \geq 3 \text{ nm}^{-1}$  の動的音速も減速し、断熱音速に近い値を取った。この系の  $S(Q, \omega)$  には、約 30 meV のエネルギーに共有結合の伸縮モードの励起を表すピークが現れる。伸縮モードのエネルギーは第1原理分子動力学シミュレーションの結果とも一致する。動的音速が断熱音速より速くなるメカニズムには半導体液体中に形成される共有結合性のクラスターが関与していると考えられる。このクラスターサイズは、伸縮モードのピーク幅から見積もられた共有結合の寿命と強く関連していることが明らかになった。

#### ② 膨張した金属流体の動的構造

臨界点近傍の密度  $9 \text{ gcm}^{-3}$  の金属-非金属転移領域で断熱音速より 3 倍速い動的音速が観測された流体水銀の動的性質の理解を深めるため、25 MPa の高压下で沸点 (約 960°C) 直前の  $11 \text{ gcm}^{-3}$  まで体積膨張させた流体水銀のX線散乱、X線小角散乱及び高分解能非弾性X線散乱実験を行った。これらの実験で得られた静的構造因子  $S(Q)$  ならびに  $S(Q, \omega)$  の  $\omega$  積分値は、実験精度の範囲内で相互に一致していた。密度  $12 \text{ gcm}^{-3}$  と  $11 \text{ gcm}^{-3}$  の  $S(Q, \omega)$  に減衰振動子モデルを適用して音響モードの励起エネルギーを求めたところ、超音波により測定された音速に比べて、約 30~43% 速い正の分散を示した。さらに粘弾性理論に基づくモデル関数を適用した結果、非弾性X線散乱により観測された音響モードは  $2 < Q < 7 \text{ nm}^{-1}$  の範囲で固体的な弾性波の性質を併せ持つ音響モードであることが判明した。常温常圧の液体水銀の  $S(Q, \omega)$  について同様の解析を行ったところ、固体的な弾性波の性質を併せ持つ音響モードが  $15 \text{ nm}^{-1}$  まで続いていた。以上の結果は、体積膨張により生じた空孔により、膨張した流体水

銀の密度ゆらぎが  $10 \text{ nm}^{-1}$  付近で固体的な弾性波の性質から拡散的な個別運動モードに遷移することを示唆している。

### ③超臨界流体イオウの静的・動的構造

流体イオウの臨界点は、 $1037^\circ\text{C}$ 、 $20.4 \text{ MPa}$  にあり、新しい高温高压容器を用いて超臨界流体イオウの高分解能非弾性散乱実験を行うことができる。以前に行ったX線回折実験の結果は、得られた配位数は臨界密度付近の超臨界流体イオウが2原子分子からなることを示唆するが、結合距離は鎖状分子の値であるという矛盾したものであった。流体中の共有結合に関する情報を得るため、臨界密度付近の超臨界流体イオウの伸縮モードに着目して高分解能非弾性X線散乱実験を行った。その結果、伸縮モードの平均エネルギーは鎖状分子または8員環分子のものほとんど一致し、配位数が示す2原子分子ではないことが明らかになった。宗尻、星野らが行った第1原理シミュレーションの結果に従って、この実験結果を説明すると、短い鎖状分子の鎖端の共有結合は非常に短く、鎖内には比較的長い共有結合が存在する。実験から導かれた  $S(Q)$  は低角側の情報が不十分なため、2体分布関数の長距離側の精度が悪く長い共有結合を数え落として配位数を小さく見積もっていたと考えられる。これらのことから、体積が膨張した臨界密度付近では誕生した2原子分子間の距離が短いので、2原子分子どおしが強い相関をもって分布していて、共有結合距離が孤立2原子分子に比べて長くなっていると解釈できる。

### ④流体セレンの伸縮モード

融点 ( $217^\circ\text{C}$ ) 近傍で半導体的性質を有する液体 Se は共有結合で結ばれた2配位鎖状構造を有する。温度と圧力を上げると液体 Se は、気-液臨界点近傍で金属的な流体に変化することが知られている。我々は、非弾性X線散乱測定により伸縮モードを観測して、共有結合の温度変化を調べた。融点近傍で数ピコ秒の寿命をもつと言われている共有結合が、 $1200^\circ\text{C}$  の高温では  $0.1$  ピコ秒まで短くなることがわかった。これは平均構造は2配位であるが共有結合の様子が温度の上昇と共に大きく変わることを示唆しており、金属化のメカニズムを理解する上で重要な結果である。

### ⑤液体鉄中のクラスター

遷移金属である液体鉄のX線回折実験を SPring-8 で行い、逆モンテカルロ法を用いて3次元原子配置を調べた結果、液体鉄中に正20面体クラスターが形成されている、より直接的な証拠を得た。さらに実験から導かれた  $S(Q)$  を元に、有効原子間ポテンシャルを導

いて、孤立クラスターのポテンシャルエネルギーを計算した。その結果、体心立方型クラスターよりも20面体クラスターが安定であることが判明した。これは、過冷却液体がガラス転移するメカニズムを理解する上で重要な成果である。

### (2)まとめ

前節で示したように、液体金属や金属、半導体、絶縁体流体中の原子・分子ダイナミクスを調べてきた。固体と同じくらい高い密度をもつ流体中の原子は周りを取り囲む原子の数が多く、短い時間尺度では固体中の原子同様平衡位置を中心に振動運動している。少し長い時間たつと、空いた位置へとジャンプ運動することができ、流体の流動性が実現する。このジャンプ運動では多数の原子が相関をもって移動していると考えられている。密度の大きい室温の液体水銀はこのような原子ダイナミクスが実現していて不思議はない。実際、室温では固体的な振動運動が支配的で、音響モードを表す明瞭なピークが  $S(Q, \omega)$  に現れる。本研究により、体積膨張した  $935^\circ\text{C}$  の流体水銀においても、音響モードを表す明瞭なピークが  $S(Q, \omega)$  に確認された。これは、明瞭なピークが現れる  $Q$  に相当する空間スケールでは、原子が固体的な平衡位置を保って振動運動していることを示唆している。興味深いことに、 $Q$  が大きくなり平均原子間距離の2倍程度の短い空間スケールになると  $S(Q, \omega)$  の明瞭なピークが消失する。この空間スケールでは、原子は相関を持たない個別的・拡散的運動をしていると考えられる。音響モードの励起エネルギーを粘弾性理論に従って解釈すると、個別運動する粒子は孤立原子の性格を示すのに対し、固体的振動運動する原子は金属中のイオンの性質を示すことが明らかになった。孤立原子の性格の発現には、重元素に作用する相対論的効果が2価金属である水銀の電子状態をヘリウムに類似な閉殻構造にする影響も関係していると考えられる。以上の結果は、原子が個別運動するか集団運動するかで、伝導電子の役割が変化することを示唆するものである。

伝導電子の存在が流体中の原子・分子ダイナミクスにどのような影響を及ぼすかについては、流体  $\text{As}_2\text{Se}_3$  の実験も興味深い結果を提供している。融点近傍の半導体流体では、1ピコ秒程度の寿命の共有結合により形成される、3配位の As と2配位の Se からなるネットワーク状のクラスターが固体的な音響モードの

起源と考えられる。金属化が促進して共有結合に参加していた電子が伝導に寄与しはじめるとクラスターが崩壊して、原子どうしが頻繁に衝突を繰り返す熱的な音響モードへと変化する。半導体流体では原子間に異方的な多体相互作用がはたらくが、金属流体ではこれが等方的な2体相互作用で近似できるものに変化することを示唆している。

本研究で得られた成果は、流体水銀の金属-非金属転移領域に現れる断熱音速より3倍速い動的音速の起源を明らかにする上で非常に有用である。流体  $\text{As}_2\text{Se}_3$  の研究では半導体-金属転移領域において2.5倍速い動的音速が見出されたので、速い動的音速は電子状態が転移する領域では普遍的に現れる現象である可能性が高くなった。流体水銀の場合、金属-非金属転移に近づくに伴う断熱音速の減速が非常に大きく、石川ら(2004)が報告した結果だけでは、動的音速との速さの比が見かけ上3倍になっているだけという解釈も成り立っていたが、流体  $\text{As}_2\text{Se}_3$  の実験結果により、動的音速自身も半導体-金属転移領域で少し速くなる場合があることが明らかになった。これらの結果は、断熱音速の減速の原因に加え、動的音速自身の状態依存性を詳細に検討しなければ、金属-非金属転移領域に現れる特異な動的挙動を理解できないことを示唆している。今後、伝導電子の有無が、流体中の原子の個別運動と集団運動へどのような変化をもたらすのかを、より詳細に明らかにしていくことが重要である。

#### 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18件)

1. K. Hagita, R. L. McGreevy, T. Arai, M. Inui, K. Matsuda and K. Tamura, First example of multi-scale reverse Monte Carlo modeling for small-angle scattering experimental data using reverse mapping from coarse-grained particles to atoms, *J. Phys.: Condens. Matter* **22**, 404215(4pp) (2010) 査読あり

2. 乾雅祝、梶原行夫、松田和博、石川大介、筒井智嗣、アルフレッド バロン、X線非弾性散乱による流体ダイナミクスの研究(解説) 放射光 Vol.23, No.4, 219-228 (2010). 査読なし

3. Y Kajihara, M Inui, K Matsuda and Y Tomioka, Small-angle x-ray scattering and density measurements of liquid  $\text{Se}_{50}\text{-Te}_{50}$

mixture at high temperatures and high pressures using synchrotron radiation, *J. Phys. Conf. Ser.* **215**, 012078(4pp) (2010) 査読あり

4. M Inui, Y Kajihara, Y Azumi, K Matsuda and K Tamura, Wide angle X-ray scattering measurements of supercritical water using synchrotron radiation, *J. Phys. Conf. Ser.* **215**, 012090(4pp) (2010) 査読あり

5. M. Inui, K. Maruyama, Y. Kajihara and M. Nakada, Icosahedral ordering in liquid iron studied via x-ray scattering and Monte Carlo simulations, *Phy. Rev. B* **80**, 180201(R) (4pp) (2009) 査読あり

6. S. Hosokawa, F. Demmel, W.-Ch. Pilgrim, M Inui, S. Tsutsui and A. Q. R. Baron, Acoustic Phonons in Molten NaI, *Electrochemistry* **77**, 608-610 (2009) 査読あり

7. S. Hosokawa, M. Inui, Y. Kajihara, K. Matsuda, T. Ichitsubo, W.-C. Pilgrim, H. Sinn, L. E. Gonzalez, D. J. Gonzalez, S. Tsutsui, and A. Q. R. Baron, Transverse Acoustic Excitations in Liquid Ga, *Phy. Rev. Lett.* **102**, 105502(4pp) (2009) 査読あり

8. Y. Kajihara, M. Inui, S. Hosokawa, K. Matsuda and A. Q. R. Baron, Dynamical inhomogeneity of liquid Te near the melting temperature proved by inelastic x-ray scattering measurements, *J. Phys.: Condens. Matter* **20**, 494244(7pp) (2008) 査読あり

9. S. Cazzato, T. Scopigno, S. Hosokawa, M. Inui, W.-C. Pilgrim, and G. Ruocco, High frequency dynamics in liquid nickel: An inelastic x-ray scattering study, *J. Chem. Phys.* **128**, 234502 (2008) 査読あり

10. M. Inui, S. Hosokawa, K. Matsuda, S. Tsutsui and A.Q.R. Baron, Collective dynamics and de Gennes narrowing in polymeric liquid Se: High-resolution inelastic x-ray scattering, *Phys. Rev. B*, **77**, 224201 (2008) 査読あり

11. S. Hosokawa, M. Inui, K. Matsuda, D. Ishikawa and A.Q.R. Baron, Damping of the collective modes in liquid Fe, *Phys. Rev. B*, **77**, 174203 (2008) 査読あり

12. S. Hosokawa, K. Matsuiishi, M. Inui, Y. Kajihara, S. Tsutsui and A.Q.R. Baron, Collective dynamics of  $As_2S_3$  glass investigated by inelastic X-ray scattering, *J. Non-Cryst. Solids* **354**, 2715-2718(2008) 査読あり

〔学会発表〕(計 57 件)

1. 乾雅祝, 梶原行夫, 中村惇平, 松田和博, 八尾誠, 石川大介, 筒井智嗣, アルフレッド・バロン, 高温高圧下の液体水銀の非弾性 X 線散乱実験, 日本物理学会第 66 回年次大会, 2011 年 3 月 25 日, 新潟市

2. 梶原行夫, 乾雅祝, 松田和博, 液体-液体相転移に伴うゆらぎと「速い音速」現象, 日本物理学会第 66 回年次大会, 2011 年 3 月 25 日, 新潟市

3. 乾雅祝, 梶原行夫, 石川大介, 筒井智嗣, アルフレッド・バロン, 細川伸也, 松田和博, 田村剛三郎, 高温高圧下の超臨界流体イオウの動的構造, 第 24 回日本放射光学会年会放射光科学合同シンポジウム, 2011 年 1 月 10 日, つくば市

4. 乾雅祝, 梶原行夫, 石川大介, 筒井智嗣, アルフレッド・バロン, 細川伸也, 松田和博, 田村剛三郎, 放射光を用いた超臨界流体イオウの高分解能非弾性 X 線散乱測定, 第 51 回高圧討論会, 2010 年 10 月 22 日, 仙台市

5. Y. Kajihara, D. Ishikawa, M. Inui, K. Matsuda, S. Tsutsui and A.Q.R. Baron, Fast sound and liquid-liquid phase transitions: liquid water and liquid chalcogen systems, 第 7 回非弾性 X 線散乱国際学会, 2010 年 10 月 11-14 日, グルノーブル市, フランス

6. A. Yamane, F. Shimojo, K. Hoshino, Effects of system size and inner-core 2p states on melting of dense sodium at high pressure: ab initio molecular-dynamics simulation, 第 14 回液体及びアモルファス金属国際会議, 2010 年 7 月 16 日, ローマ市, イタリア

7. M. Inui, Y. Kajihara, K. Matsuda, S. Hosokawa, K. Tamura, M. Yao, Y. Tsuchiya, D. Ishikawa, S. Tsutsui, A. Q. R. Baron, Inelastic x-ray scattering measurements of liquid chalcogen and chalcogenide at high temperatures and high pressures, 第 14 回液体及びアモルファス金属国際会議, 2010 年 7 月 16 日, ローマ市, イタリア

8. K. Maruyama, H. Endo, H. Hoshino, Y. Kajihara, M. Nakada, S. Sato, Chain geometries in expanded liquid  $Se_{80}Te_{20}$  mixture near the semiconductor to metal transition, 第 14 回液体及びアモルファス金属国際会議, 2010 年 7 月 12 日, ローマ市, イタリア

9. Y. Kajihara, M. Inui, K. Matsuda, D. Ishikawa, S. Tsutsui and A. Q.R. Baron Static and dynamical inhomogeneity at liquid-liquid phase transition of Se-Te mixtures, 第 14 回液体及びアモルファス金属国際会議, 2010 年 7 月 12 日, ローマ市, イタリア

10. S. Hosokawa, M. Inui, Y. Kajihara, K. Matsuda, Y. Ohmasa, M. Yao, T. Ichitsubo, W.-C. Pilgrim, H. Sinn, L. E. Gonzalez, D. J. Gonzalez, S. Tsutsui, A. Q. R. Baron, Transverse acoustic phonon excitations in liquid metals, 第 14 回液体及びアモルファス金属国際会議, 2010 年 7 月 12 日, ローマ市, イタリア

11. S. Munejiri, F. Shimojo, K. Hoshino, M. Inui, Structure of expanded liquid sulfur studied by ab initio molecular dynamics simulations, 第 14 回液体及びアモルファス金属国際会議, 2010 年 7 月 12-16 日, ローマ市, イタリア

12. S. Hosokawa, M. Inui, T. Bryk, I. Mryglod, F. Demmel, W.-C. Pilgrim, Y. Kajihara, K. Matsuda, M. Yao, Y. Ohmasa, S. Tsutsui, and A. Q. R. Baron, Optic phonon modes in a molten salt, 第 14 回液体及びアモルファス金属国際会議, 2010 年 7 月 12-16 日, ローマ市, イタリア

13. K. Matsuda, T. Nagao, M. Inui, Y. Kajihara, J. Nakamura, K. Tamura, M. Yao, M. Itou, Y. Sakurai, X-ray Compton scattering measurements of liquid silicon, 第 14 回液体及びアモルファス金属国際会議, 2010 年 7 月 12-16 日, ローマ市, イタリア

14. 乾雅祝, 梶原行夫, 石川大介, 筒井智嗣, アルフレッド・バロン, 細川伸也, 松田和博, 田村剛三郎, 液体ならびに超臨界流体イオウの高分解能非弾性 X 線散乱測定, 日本物理学会秋季大会, 2010 年 9 月 26 日, 堺市

15. 乾雅祝, 梶原行夫, 金属領域における液体水銀の X 線回折測定, 物理学会秋季大会, 2010 年 9 月 26 日, 堺市

16. 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, 高温高圧下における液体  $\text{As}_2\text{Se}_3$  の非弾性 X 線散乱測定, 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010 年 3 月 22 日, 岡山市

17. M. Inui, Y. Kajihara, Y. Azumi, K. Matsuda and K. Tamura, Wide and small angle X-ray scattering measurements of supercritical water using synchrotron radiation, AIRAPT2009, 2009 年 7 月 22 日, 東京

18. 乾雅祝, 丸山健二, 梶原行夫, 中田克, 放射光を利用した液体鉄の X 線回折測定, 日本物理学会秋季大会, 2009 年 9 月 27 日, 熊本市

19. 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, 日本物理学会第 64 回年次大会, 2009 年 3 月 29 日, 東京

20. M. Inui, Y. Kajihara, K. Matsuda, S. Hosokawa, S. Tsutsui, A. Q. R. Baron, Collective Dynamics in Molten CuCl Observed by High-Resolution Inelastic X-ray Scattering at SPring-8, Joint Symposium on Molten Salts, 2008 年 10 月 20 日, 神戸市

21. 乾雅祝, イオン性液体の非弾性 X 線散乱, 物理学会秋季大会, 2008 年 9 月 22 日, 盛岡市

22. M. Inui, D. Ishikawa, K. Matsuda, Y. Kajihara, K. Tamura, Static and Dynamic Structure of Supercritical Fluid Metals, New opportunities and challenges for liquid and amorphous materials science, 2008 年 9 月 3 日, グルノーブル市, フランス

[その他]

<http://home.hiroshima-u.ac.jp/masinui/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

乾 雅祝 (INUI MASANORI)

広島大学・大学院総合科学研究科・教授

研究者番号 : 40213136

### (2) 研究分担者

星野 公三 (HOSHINO KOZO)

広島大学・大学院総合科学研究科・教授

研究者番号 : 30134951

梶原 行夫 (KAJIHARA YUKIO)

広島大学・大学院総合科学研究科・助教

研究者番号 : 20402654

### (3) 連携研究者

細川 伸也 (HOSOKAWA SHINYA)

広島工業大学・工学部・教授

研究者番号 : 30183601