

平成 22 年 5 月 20 日現在

研究種目：特定領域研究  
 研究期間：2005年度～2009年度  
 課題番号：17073002  
 研究課題名（和文）イオン液体ならしめているものは？

研究課題名（英文） What makes them ionic liquids?

研究代表者

西川 恵子 (NISHIKAWA KEIKO)

千葉大学・大学院融合科学研究科・教授

研究者番号：60080470

#### 研究成果の概要(和文)：

イオン液体をイオン液体ならしめている要因を、多角的な観点から解明することがテーマである。代表的な研究成果を2つまとめる。

1) 凝固・融解過程の解明：超高感度熱分析とラマン散乱を併用し、熱物性と構造を関連づけながらイオン液体の特異性について解明した。相変化はすべてイオンの立体配座の変化とリンクしており、立体配座の多様性がイオン液体の熱物性に本質的な効果を及ぼしていると結論した。また、相変化に伴うダイナミクスを NMR の緩和時間で検討し、グループの運動性の違いが複雑な熱挙動の一原因であることを明らかにした。

2) イオン液体中に生成する金ナノ粒子の構造研究：標記の金ナノ粒子について、粒径サイズを決める要因と生成したナノ粒子の構造について検討した。イオン液体の種類と粘度が最も強い因子であることを明らかにした。

#### 研究成果の概要(英文)：

Ionic liquids constitute a new class of liquids, which attract much attention because of their characteristic properties and potential utilities as functional liquids. Unique properties are remarkably manifested in their thermal behaviors such as premelting over a wide temperature range, excessive supercooling, and the existence of complex thermal histories. To elucidate their uniqueness, we have made systematic studies with calorimetry, Raman spectroscopy and relaxation measurements of NMR, aiming at deeper understanding of the underlying mechanism. The studies show that one of most important factors to cause the uniqueness is the flexibility of alkyl chains and various conformations.

It was recently discovered that sputter deposition of Au onto the surface of an ionic liquid generates nanoparticles in the liquid with no additional stabilizing agents. With small-angle X-ray scattering experiments, it is revealed that the particle size is relatively uniform for a fixed temperature and that the definitive factors to determine the size are the type of ionic liquid and temperature of the capture ionic liquid.

#### 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	74,900,000	0	74,900,000
2006年度	28,500,000	0	28,500,000
2007年度	28,000,000	0	28,000,000
2008年度	28,500,000	0	28,500,000
2009年度	24,700,000	0	24,700,000
総計	184,600,000	0	184,600,000

研究分野：化学

科研費の分科・細目：基礎化学・物理化学

キーワード：複雑凝集系・イオン液体・相転移・構造変化・ナノ粒子・熱測定・Raman 散乱  
小角 X 線散乱

## 1. 研究開始当初の背景

『塩（えん）』であるにもかかわらず、常温で液体である空气中で安定な物質群が、1992年に創製された。これらは、イオン液体（ionic liquid）と名付けられ、物質科学の世界で大きな注目を浴びるようになった。「何故融点が低いのか？」という素朴な疑問に始まり、通常の液体の概念を破るような多様でユニークな現象に、物理化学者は大きな興味を示した。一方、イオン液体を利用しようとする研究者の注目点の一つは、イオン液体が蒸発しない液体であることである。液体には蒸発が付きものであるが、イオン液体は空气中で安定に存在し、蒸気圧がゼロであり、様々な物質を溶解させ、イオン伝導度も大きい。これを媒体として用いる新しい多彩な科学の展開への期待は大きい。イオン液体の多くは有機イオンや錯イオンから構成されている。材料科学者は、イオンをデザインすることにより様々な機能を有する液体を創製できることに注目した。このような状況下であって、イオン液体のユニークな構造と物性を解明することが研究当初の目指すところであった。

## 2. 研究の目的

イオン液体は様々な特異的な性質を示し、中には、液体の概念の転換を迫るものもある。イオン液体をイオン液体ならしめている要因は何かを様々な観点から明らかにする。当初掲げたのは次の3つの観点であった。

- 液体構造：** X線回折や広域X線吸収微細構造(EXAFS)から、通常の分子性液体と比較しながら、イオン液体の構造の特徴を明らかにする。
- 凝固・融解過程の解明：** 結晶⇄液体の相転移における超高感度熱測定と、X線回折、ラマン散乱、EXAFS等と同時測定を行い、「なぜイオン液体の融点は低いのか？」を始めとするイオン液体の液体としての特異性について、熱物性と構造と関連づけながらを解明する。
- イオン液体の水溶液化学：** 最も特異的な分子性液体である水を溶媒としてイオン液体水溶液化学を展開する。熱測定より、ケミカルポテンシャル、エンタルピー、エントロピーなどの部分モル（イオン液体を1単位ごと水溶液に入れたときの応答量）

から溶液中でのイオンのエンタルピー的環境・エントロピー的環境を明らかにし、小角X線散乱より混合状態についての情報を得て、イオン液体水溶液化学のユニークさを解明する。

## 3. 研究の方法

イオン液体は複雑凝集系の代表である。このため、複眼的な視点に立った、系統的／多角的な研究が必要である。このため、様々な手法を駆使し、イオン液体のユニークさを解明してきた。用いた手法は、以下の通りである。小角X線散乱、超高感度熱測定、Raman散乱、NMR測定、X線吸収微細構造、ケミカルポテンシャルを求めるための蒸気圧測定、部分モルエンタルピーを得るための熱量測定、フェムト秒光カー効果分光等々。また、理論研究者や、材料化学を専門とする研究者とも共同実験を数多く行った。

## 4. 研究成果

### ① 凝固・融解過程の解明

結晶⇄液体の相転移に焦点をあて、超高感度熱分析と、ラマン散乱等を併用し、熱物性と構造を関連づけながらイオン液体の特異性について解明している。熱流速として3nWの感度と安定性を有し（市販装置の千倍の感度と安定性）、かつ準静的と近似できる熱変化を可能にした手作りの示差熱分析（DSC）装置を用いた超高感度熱分析で、今まで見だされていないいくつかの熱現象を世界で始めて発見することに成功している。すなわち、 $C_n$ -methylimidazolium カチオン（ $[C_n\text{mim}]^+$ ）のハロゲン化物（ $[C_4\text{mim}]\text{Br}$ 、 $[i\text{-}C_3\text{mim}]\text{Br}$ 、 $[C_2\text{mim}]\text{Br}$ など）について、3つのユニークな熱現象を発見した。すなわち、融解・凝固が行きつ戻りつする rhythmic melting and crystallization、間歇的に結晶化が起こる intermittent crystallization、前駆融解過程で可逆的に起こる融解・結晶化過程である。これらの熱物性として特異的な現象は、すべて、コンフォメーションの変化と相変化や熱履歴などの熱現象がリンクしていることに起因すると結論される。

具体的に纏めると以下の通りである。 $[C_4\text{mim}]\text{Br}$ において、準静的と言えるほどの非常に遅い昇温速度（0.02mK/s）で、premelting領域の詳細なDSC実験を行った所、凝固・融解が行きつ戻りつするリズム的

な相変化が初めて観測された。度数分布の幅から、リズム的な凝固・融解に関わるドメインの大きさが推算され、 $10^{12}$ - $10^{13}$ 程度の[C<sub>4</sub>mim]Br units が関わっていることが明らかにされた。

[i-C<sub>3</sub>mim]Br (i-C<sub>3</sub>mim: iso-propyl-methylimidazolium) について同様な実験を行ったところ、リズム的な凝固・融解現象に加えて、間歇的な熱の放出が観測された。我々は、これを『間欠的結晶化現象』と名付けた。premelting 領域において、スムーズな結晶化に取り残されたドメインにおいて、その中のイオンが構造を変えながら結晶化していく現象と理解される。熱量の出入りから概算すると、ドメインをつくっている量は  $10^{14}$  units 程度であることがわかった。

イオン液体中にはドメイン構造が存在するのではないかと推察されてきた。これらの結果は、相転移に伴うドメイン構造の存在とその大きさを明らかにした初めての実験と位置づけられる。また、isomer の存在が予想される最も簡単な ethyl 基の場合で、同様なリズム的な凝固・融解過程や間歇的結晶化が起こっており、イオン液体に特徴的な現象として一般化できるかもしれない。

### ② 相転移におけるスローダイナミクスの解明

相変化などの多くのイオンが関わる協同的動的挙動は、 $10^{-2}$ ~ $10^2$ 秒 order の slow dynamics で特徴づけられる。①で述べた熱現象をダイナミクスの立場から、NMR の緩和時間 ( $T_1$ ,  $T_2$ ) で検討した。低周波数 NMR を用いて、<sup>1</sup>H から C<sub>n</sub>-methyl-imidazolium カチオン全体のダイナミクスを、高分解能 NMR を用いて、<sup>13</sup>C から各炭素のダイナミクスを検討した。結晶化やガラス転移以外に、各原子の運動が凍結する coagulated state を [C<sub>4</sub>mim]Br, [C<sub>3</sub>mim]Br で見つけた。炭素の運動性の観点から、imidazolium 環およびアルキル基の根本 (ねもと) の炭素、N-methyl 基の炭素、あるアルキル基末端の炭素と大別され、これらの運動性は異なる温度依存性を示した。これらのタイプの異なるグループの運動性が、複雑な熱挙動を示す一つの原因であることが明らかになった。アルキル基末端の炭素や N-methyl 基の炭素は結晶状態でも運動しており、その活性化エネルギーは 12~13 kJ/mol であった。

### ③ イオン液体の水溶液化学

イオン液体水溶液化学を展開した。エンタルピー、エントロピー、体積などの部分モル量 (イオン液体を 1 分子ごと水溶液に入れたときの応答量) を求め、溶液中でのイオンのエンタルピー的環境・エントロピー的環境を明らかにした。小角 X 線散乱より求まる混合状態の知見と組み合わせ、イオン液体水溶液化学のユニークさを解明した。主な成果は、

イオン液体を構成する代表的なアニオンおよびカチオンについてエンタルピー-エンタルピー相互作用から、疎水性・親水性を評価したことである。また、[C<sub>2</sub>mim]カチオンを持つ幾種類かのイオン液体水溶液において、ケミカルポテンシャルを求めた。

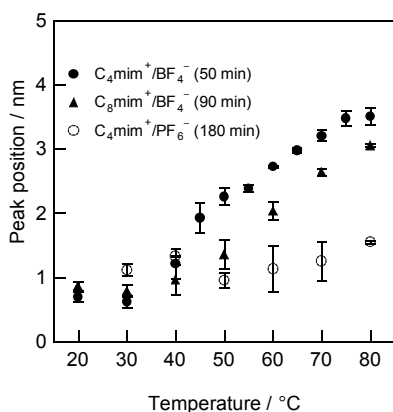
### ④ 超高速分光法による近接分子間のダイナミクスの解明

フェムト秒光カー効果分光により、イオン液体の近接分子間分子間相互作用の知見を得た。分子性液体と比較することにより、イオン液体の特異性を超高速ダイナミクスの観点から解明することが目的である。今回は、XP6 (X=P, As, Sb) について重原子置換効果に注目した。

### ⑤ イオン液体中に生成する金ナノ粒子の構造研究

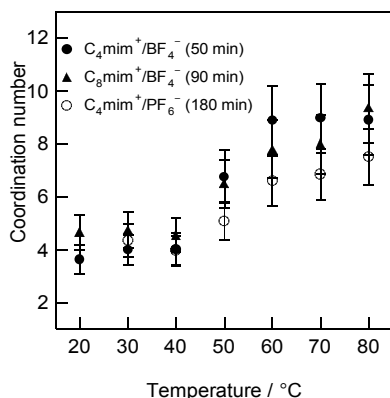
アルゴンスパッタによるイオン液体中への Au クラスターの調製は、安定化剤を用いることなく、比較的サイズのそろったクラスターを調製できる画期的手法として注目を集めている。一方、イオン液体は「デザイナー液体」とも呼ばれるように、カチオン、アニオンの組み合わせや官能基の違いにより、その性質を大きく変化させることができる物質である。本研究ではこのアルゴンスパッタにより調製された Au クラスターの特性を、サイズ分布および電子構造の面から明らかにすることを目的とした。特にイオン液体の違いに着目し、C<sub>n</sub>mim<sup>+</sup>/BF<sub>4</sub><sup>-</sup> (n = 4, 6, 8) および C<sub>4</sub>mim<sup>+</sup>/PF<sub>6</sub><sup>-</sup> を用いてイミダゾリウムカチオンのアルキル鎖長およびアニオン種の影響を検討した。また、スパッタ時の電子衝撃による試料の温度上昇の影響を考慮し、イオン液体の温度の効果についても検討を行った。小角 X 線散乱 (SAXS) から Au クラスターのサイズ分布を求め、広域 X 線吸収微細構造 (EXAFS) から Au の局所的な構造 (Au-Au 距離、配位数) を、紫外可視吸収分光よりクラスター表面の集団的電子構造を評価した。

各イオン液体中に調製された Au クラスターのサイズ分布における最大分布径 (Peak position) のスパッタ温度依存性を次頁の図に示した。イオン液体の種類とスパッタ時の温度を変化させることにより、0.7 から 4 nm 程度まで Au クラスターのサイズを制御できることが明らかとなった。また、サイズは温度に対して一様に変化するのではなく、特に BF<sub>4</sub><sup>-</sup> をアニオンとするイオン液体においては 30-40 °C で閾値がみられた。これは、Au クラスターの成長がクラスターの拡散による衝突・会合だけではなく、イオン液体の Au クラスターに対する安定化能やクラスター自体の安定構造によっても支配されているためであると考えられる。



一方、イオン液体の違いに着目すると、イミダゾリウムカチオンのアルキル鎖の伸長に伴いサイズが小さくなる傾向を示した。また、PF<sub>6</sub>をアニオンとするイオン液体においてはBF<sub>4</sub>と比較しサイズが小さくなる傾向を示した。金属ナノ粒子・クラスターは一般的に表面が求電子的な状態にあるとされている。このため、アニオン種の違いによる効果がより顕著に現れたと考えられる。カチオンのアルキル鎖長にも依存することから、アニオン近傍に存在するカチオンもまた、クラスターの安定化に寄与しているものと考えられる。

AuのLIII吸収端EXAFSから求めた、配位数のスパッタ温度依存性を下図に示した。いずれも40°C付近に閾値を持ちSAXSから得られた最大分布径の温度依存性と似た傾向を示した。20-40°Cにおける配位数はいずれも4程度であり、これは正八面体型のクラスターの最小単位に相当する。20-40°Cの領域において、このような構造のクラスターが安定に存在しているものと考えられる。C<sub>4</sub>mim<sup>+</sup>/BF<sub>4</sub><sup>-</sup>中に調製されたAuクラスターのUV-VISスペクトルより、BF<sub>4</sub>をアニオン



とするイオン液体においては、イオン液体とAuクラスター表面との強い相互作用は認められず、アニオンが静電的に配位して、クラスターを安定化していることが明らかとなった。

## 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-原著論文] (計 38 件)

- ① Can Temperature Control the Size of Au Nanoparticles Prepared in Ionic Liquids by Sputter Deposition Technique?  
Y. Hatakeyama, S. Takahashi, Keiko Nishikawa, *J. Phys. Chem. C* (in press).
- ② Syntheses and crystal structures of two ionic liquids having halogen-bonding groups: 4,5-dibromo- & 4,5-diiodo-1-butyl-3-methylimidazolium trifluoromethanesulfonates  
T. Mukai and Keiko Nishikawa  
*Solid State Science* **12**, 783-788 (2010).
- ③ NMR study on relationships between reorientational dynamics and phase behaviour of room-temperature ionic liquids: 1-alkyl-3-methylimidazolium cations  
M. Imanari, K. Uchida, K. Miyano, H. Seki and Keiko Nishikawa  
*Phys. Chem. Chem. Phys.* **12**, 2959-2967 (2010).  
**(Cover Article of No.12 Vol. 12)**
- ④ Aspect-Ratio Dependence on Formation Process of Gold Nanorods Studied by Time-Resolved Distance Distribution Functions.  
T. Morita, Y. Hatakeyama, K. Nishikawa, *et al.*,  
*J. Phys. Chem. C* **114**, 3804-3810 (2010)
- ⑤ Phase Behaviors of Room Temperature Ionic Liquid Linked with Cation Conformational Changes: 1-Butyl-3-methylimidazolium Hexafluorophosphate  
T. Endo, K. Tozaki and K. Nishikawa  
*J. Phys. Chem. B* **114**, 407-411 (2010).
- ⑥ Comparison of Interionic/Intermolecular Vibrational Dynamics between Ionic Liquids and Concentrated Electrolyte Solutions.  
T. Fujisawa, K. Nishikawa, and H. Shirota  
*J. Chem. Phys.* **131**, 244519\_1-14(2009).
- ⑦ Polymorphic Properties of Ionic Liquid of 1-Isopropyl-3-methylimidazolium Bromide  
M. Kawahata, T. Endo, H. Seki, K. Nishikawa, and K. Yamaguchi  
*Chem. Lett.* **38**(12) 1136-1137(2009).
- ⑧ Ultrafast Dynamics in Aprotic Molecular Liquids: A Femtosecond Raman-Induced Kerr Effect Spectroscopic Study.  
H. Shirota, T. Fijisawa, H. Fukazawa and K. Nishikawa  
*Bull. Chem. Soc. Jpn.* **82** (11), 1347-1366 (2009).
- ⑨ Hydrophobicity/Hydrophilicity of 1-Butyl-2,3-dimethyl and 1-Ethyl-3-methylimidazolium

Ions: Towards Characterization of Room Temperature Ionic Liquids

H. Kato, K. Miki, K. Nishikawa, and Y. Koga  
*J. Phys. Chem. B*, **113**, 14754-14760 (2009).

⑩ Thermodynamic Study on Phase Transitions of Poly(benzyl methacrylate) in Ionic Liquids Solvent

T. Ueki, A. Ayusawa Arai, T. Morita, K. Nishikawa, M. Watanabe et al.,  
*Pure & Applied Chemistry* **81**, 1829-1841 (2009).

⑪ Melting and Crystallization Behaviors of an Ionic Liquid, 1-Isopropyl-3-methylimidazolium Bromide, Studied by Using Nanowatt-Stabilized Differential Scanning Calorimetry.

K. Nishikawa, S. Wang, T. Endo, and K. Tozaki  
*Bull. Chem. Soc. Jpn.* **82** (7), 806-812 (2009).

⑫ Atomic Mass Effects of [XF<sub>6</sub>] ionic Liquids. II. Theoretical Study.

T. Ishida, K. Nishikawa and H. Shirota  
*J. Phys. Chem. B* **113**, 9840-9851 (2009).

⑬ Atomic Mass Effects of [XF<sub>6</sub>] ionic Liquids. I. Experimental Study.

H. Shirota, K. Nishikawa and T. Ishida  
*J. Phys. Chem. B* **113**, 9831-9839 (2009).

⑭ Halogen-bonded and hydrogen-bonded network structures in crystals of 1-propyl- and 1-butyl-4,5- dibromo-3-methylimidazolium bromides.

Tomohiro Mukai and Keiko Nishikawa  
*Chem. Lett.* **38**, No. 5, 402-403 (2009).

⑮ Small-Angle X-ray Scattering Study on Au Nanoparticles Dispersed in Ionic Liquids of 1-Alkyl-3-Methylimidazolium Tetrafluoroborate

Y. Hatakeyama, T. Torimoto, S. Kuwabata, K. Nishikawa  
*J. Phys. Chem. C* **113** (10), 3917-3922 (2009).

⑯ Characterization of the molecular reorientational dynamics of the neat ionic liquid 1-butyl-3-methylimidazolium bromide in super cooled state using <sup>1</sup>H and <sup>13</sup>C NMR spectroscopy.

M. Imanari, H. Seki, K. Nishikawa  
*Mag. Res. Chem.* **47**, 67-70 (2009).

⑰ Chemical Potentials in Aqueous Solutions of Some Ionic Liquids with 1-Ethyl-3-methylimidazolium Cation.

H. Kato, K. Nishikawa, T. Morita, Y. Koga  
*J. Phys. Chem. B* **112**, 13344-13348 (2008).

⑱ Intermittent crystallization of ionic liquid: 1-isopropyl-3-methylimidazolium bromide

Keiko Nishikawa and Ken-ichi Tozaki  
*Chem. Phys. Lett.*, **463**, 369-372 (2008).

⑲ Isomer Populations in Liquids for 1-Isopropyl 3-methylimidazolium Bromide and Its Iodide, and Their Conformational Changes Accompanying the Crystallizing and Melting Processes.

Takatsugu Endo and Keiko Nishikawa  
*J. Phys. Chem. A*, **112**, 7543-7550 (2008).

⑳ <sup>1</sup>H NMR Study on reorientational dynamics of an ionic liquid, 1-butyl-3-methylimidazolium bromide, accompanied with phase transitions.

M. Imanari, H. Seki, K. Nishikawa  
*Chem. Phys. Lett.*, **459**, 89-93 (2008).

㉑ Self aggregation of 1-butyl-3-methylimidazolium bromide in aqueous solution.

H. Tsuchiya, M. Imanari, K. Nishikawa, H. Seki and M. Tashiro  
*Anal. Sci.*, **24**, 1369-1371(2008).

㉒ Conformational Analysis of 1-Butyl-3-methylimidazolium by CCSD(T) level Ab Initio Calculations: Effects of Neighboring Anions

S. Tsuzuki, A. Ayusawa Arai and K. Nishikawa  
*J. Phys. Chem. B*, **112**, 7739-7747 (2008).

㉓ Rhythmic Melting and Crystallizing of Ionic Liquid 1-Butyl-3-methylimidazolium Bromide

K. Nishikawa, S. Wang and K. Tozaki  
*Chem. Phys. Lett.*, **458**, 88-91 (2008).

㉔ Development of an Apparatus for Simultaneous Measurements of Raman spectroscopy and High-Sensitive Calorimetry

T. Endo, K. Tozaki, and K. Nishikawa  
*Jpn. J. Appl. Phys.*, **47** (3), 1175-1179 (2008).

㉕ Relative hydrophobicity and hydrophilicity of some "ionic liquid" anions determined by the 1-propanol probing methodology: A differential thermodynamic approach.

Hitoshi Kato, Keiko Nishikawa Yoshikata Koga  
*J. Phys. Chem. B* **112**, No. 9 2655-2660 (2008).

㉖ Melting and freezing behaviors of prototype ionic liquids, 1-butyl-3-methylimidazolium bromide and its chloride, studied by using a nano-Watt differential scanning calorimeter.

K. Nishikawa, H. Katayanagi, H. Hamaguchi, and K Tozaki

*J. Phys. Chem. B* **111**, 4894-4900 (2007).

㉗ Apparatus for simultaneous measurement of X-ray absorption factor developed for small-angle X-ray scattering beam line.

T. Morita, Y. Tanaka, K. Nishikawa  
*J. Appl. Cryst* **40**, 791-795 (2007).

㉘ Crystal Structure of 1-Butyl-3-methylimidazolium Iodide.

M. Nakakoshi, M. Shiro, T. Fujimoto, H. Seki, K. Nishikawa

*Chem. Lett.* **35**, 1400 -1401(2006).

㉙ Anomalous dynamic behavior of ions and water molecules in dilute aqueous solution of 1-butyl-3-methylimidazolium bromide studied by NMR.

M. Nakakoshi, H. Seki, Y. Koga, K. Nishikawa  
*Chem. Phys. Lett.* **427**, 87-90 (2006).

③ Effect of an “ionic liquid” cation, 1-butyl-3-methylimidazolium, on the Molecular Organization of H<sub>2</sub>O.  
K. Miki, P. Westh, K. Nishikawa, and Y. Koga  
*J. Phys. Chem. B* **109**, 9014-9019 (2005).

〔雑誌論文-総説・解説〕 (計 5 件)

① 『『ゆらぎの構造化学』の確立をめざして』  
西川恵子 化学と工業 **2009**, Vol. 62,  
895-897

② 「熱物性からみたイオン液体-特異な凝固・融解過程-」  
西川恵子、遠藤太佳嗣、東崎健一 熱測定  
**2009**, Vol. 36, 98-104

③ 「熱物性からみたイオン液体」 西川恵子  
現代化学 3月号 pp. 21-27 (2007)

〔学会発表〕 (計 75 件) 招待講演のみを記す

① K. Nishikawa “Unique Phenomena Caused by Microscopic Structural Changes of Ions” 239<sup>th</sup> American Chemical Society National Meeting & Exposition; Symposium on “Physical Chemistry of Ionic Liquids” San Francisco USA (2010, March)

② 西川恵子 「熱物性からみたイオン液体 - ミクロな構造変化がもたらすユニークな物性-」溶液化学討論会 新潟 (2009年11月) (基調講演)

③ 西川恵子 「イオン液体の相変化のメカニズム - ミクロとマクロの協奏的構造変化-」第3回分子科学討論会 名古屋 (2009年9月)

④ K. Nishikawa “Melting and crystallization behaviors of 1-isopropyl-3- methylimidazolium bromide studied by using nW-stabilized differential scanning calorimetry” COIL-3 pre-Symposium “Science of Ionic Liquids” (Cairns, Australia, May 29-30, 2009).

⑤ 西川恵子 「熱現象からみたイオン液体—凝固・融解時の特異な熱挙動—」溶融塩討論会, 横浜 (2008年11月)

⑥ K. Nishikawa “Melting and crystallizing behaviors of imidazolium-based ionic liquids” (Plenary)  
2<sup>nd</sup> International Congress on Ionic Liquids (Yokohama, Japan, August 5-10, 2007)

〔図書〕 (計 3 件)

① 西川恵子、東崎健一 1章 3節 「熱現象で観たイオン液体の特異性」  
in 『イオン液体 II-驚異的な進歩と多彩な近未来-』大野弘幸監修 シーエムシー出版  
2006 p.61-65

② 西川恵子 第1章「散乱・回折の基礎」 pp.1-5、第6章 第1節「液体と溶液」 pp.279-296 第7章 第4節「ゆらぎ」 pp.360-371 in 『第5版 実験化学講座 11「回

折』西川恵子監修 丸善、2006 (総ページ数 496 ページ)

〔その他〕

ホームページ:

<http://stchem.phys.s.chiba-u.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

西川 恵子

(千葉大学・大学院融合科学研究科・教授)

研究者番号: 6 0 0 8 0 4 7 0

(2)研究分担者/連携研究者

城田 秀明

(千葉大学・大学院融合科学研究科・准教授) (H17-19 分担者、H20-21 連携研究者)

研究者番号: 0 0 2 9 2 7 8 0

鮎澤 亜沙子

(千葉大学・大学院融合科学研究科・助教) (H17-19 分担者)

研究者番号: 4 0 4 3 1 7 5 4

東崎 健一

(千葉大学・教育学部・教授)

(H17-19 分担者、H20-21 連携研究者)

研究者番号: 3 0 1 0 2 0 3 1

森田 剛

(愛知教育大学・教育学部・准教授)

(H17-19 分担者、H20-21 連携研究者)

研究者番号: 8 0 3 3 2 6 3 3

若狭 雅信

(埼玉大学・大学院理工学研究科・教授)

(H18-19 分担者)

研究者番号: 4 0 2 0 2 4 1 0

(3)連携研究者

向井 知大

(慶応義塾大学・助教) (H21)

(4)研究協力者

Yoshikata Koga

(Univ. of British Columbia・

Senior Instructor・Emeritus)