

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月20日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2009～2012

課題番号：21245003

研究課題名（和文）

超高感度熱測定による物質科学の新展開

研究課題名（英文）

Innovative Development of Material Science with Ultra-Sensitive Calorimetry

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)：

イオン液体の相変化を主要なテーマとして、研究室製作の超高感度熱量計を用いて熱測定を行った。何が起きているのかを解明するために、個々の分子やイオンの構造変化の検知に有用な Raman 散乱とダイナミクスの情報を与える NMR の緩和時間測定も併用した。その結果、ユニークな相挙動はイオンの立体構造の多様性とそのフレキシビリティに起因することが解明された。本研究で発見された新規熱現象は、多くの試料で起こるリズム的凝固・融解現象、間歇的結晶化、可逆的凝固・融解過程、ガラスから結晶化に至る過程でのソフト化（液化）などである。

研究成果の概要(英文)：

The main samples and phenomena of this study are phase behaviors of room-temperature ionic liquids (RTILs). RTILs constitute a new class of liquids that 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 low melting point despite being salts, hardness in crystallization, premelting over a wide temperature range, excessive supercooling, and the existence of complex thermal histories. We performed the measurements of calorimetries using ultra-sensitive calorimeters, Raman scattering and relaxation times of NMR. From these experiments, we found peculiar thermal behaviours at the phase changes of RTILs, namely ‘rhythmic melting and crystallization’, ‘intermittent crystallization’ in the premelting regions and ultraslow phase changes. These unique thermal behaviours of imidazolium-based RTILs are attributed to conformational changes and flexibility of constituent ions.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	15,300,000	4,590,000	19,890,000
2010年度	7,100,000	2,130,000	9,230,000
2011年度	7,100,000	2,130,000	9,230,000
2012年度	7,200,000	2,160,000	9,360,000
年度			
総計	36,700,000	11,010,000	47,710,000

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：相転移，構造緩和，緩和時間，ゆらぎ，ダイナミクス，超高感度熱量計，

Raman 散乱，核磁気共鳴

1. 研究開始当初の背景

物理的変化・化学的変化・生命現象を問わず、変化が起こっている所には必ず熱の出入りがある。しかし、これまでの熱現象はマクロな現象としてしか捉えられてこず、熱の出入りを伴った多くの基本的で興味深い現象が見落とされてきた。

我々は装置造りを得意としており、これまで数多くの装置を手造りし、新しい方法論を提案してきた。例えば、示差熱分析 (DSC) 装置においては、3 nW の感度と安定性を有する装置 (通常の市販装置に比べ、 10^3 倍の性能) の開発に成功している。また本装置は、準静的変化と言えるほどの速度で温度を変えることもできる。

この装置を用いて我々が世界で初めて検出したのは、熱の出入りが次の相変化のトリガーとなるリズム的凝固・融解過程と、間歇的結晶過程である。前者は、イオン液体の前駆融解領域での昇温過程で見つかったものであり、 10^{12} 個程度のイオンペアが $10^0 \sim 10^1$ 秒のタイムスケールで融解・結晶化を繰り返している (Zhabotinskii 反応に対応するような振動的相変化)。後者もイオン液体の前駆融解領域での降温過程で見つかったもので、 $10^2 \sim 10^3$ nm のドメインで間歇的に結晶化が起こっている。このように、新奇的な熱現象が見つかったが、未だ 1~2 例にすぎない。市販装置に比べて 10^3 倍の性能の装置を用いることにより、多くの興味深い現象が見つかるはずである。

一方で、熱測定は、熱の出入に伴う変化の有無の判定は得意とするが、どのような変化が起こっているのかの情報を与えない。熱現象の本質を知るためには、何が起きているかの同時測定が必須である。

2. 研究の目的

以下の 3 点を本研究の中心的な目的と設定した。

- ① 物質科学にとって本質的な現象を、超高感度熱量測定により発見する (現象の発見)。
- ② 種々の分析方法を併用し、熱現象がどのような変化なのかを明らかにする (現象の解明)。必要な場合は、熱測定と同時測定できる装置を開発する。

上記の 2 点は、主に相変化を想定した研究

である。液体科学においては、混合することによる熱の出入りを測定することも重要である。そのため、第 3 のテーマとして以下を設定する。

③ 通常の溶液化学で扱われているスケールより遙かに微量の混合の際の熱の出入りを測る。この極限として、一分子を系に加えたことによる、エンタルピー的・エントロピー的利得を測定でき、溶液の混合における相互作用を考察する。(微分的溶液熱力学) いわば、分子スケール極限での溶液熱力学の展開である。

以上の 3 テーマを進めることにより、超高感度な手法で測定する熱現象を基盤とした物質科学を展開する。

3. 研究の方法

◇ 装置および方法論

現有する熱量計に加え、新たに高感度熱量計を製作して、熱測定実験の効率化を図る。

自然界で起こっている現象は様々な階層構造を持つ。それらの現象を理解するためには、現象の階層性に適した測定法を選択する必要がある。空間的にはマイクロ、メゾ、マクロスケールで、また時間的にも様々なスケールで、多角的・複眼的に現象を観測することが必要である。相変化と連動して起こる分子内立体配座変化を同時測定する装置は、DSC と Raman 散乱装置を組み合わせることにより、既に完成させた (マイクロな構造変化の情報)。本研究では、メゾスケールの構造情報を得るのに最適な小角 X 線散乱 (静的構造情報とミリ秒~秒オーダーの構造変化の追跡) 装置に工夫を加え、ナノ粒子の成長などを時分割散乱実験で追跡する。また、熱変化の起きている際の、分子のそれぞれの階層に応じたダイナミクスを解明するために、NMR の緩和時間測定を積極的に取り入れる。

◇ 対象とする試料と現象

a) イオン液体の凝固・融解過程の解明

imidazolium 系のイオン液体に加えて、イオン液体の代表的な構成カチオンである ammonium 系, pyrrolidinium 系, pyridinium 系へとカチオンの系列を増やす。また代表的な構成アニオンである (trifluoromethylsulfonyl) imide に展開していき、イオン液体そのものの特異性を探る。

b) 分子性物質の相転移の解明

相転移や構造変化が、イオン液体より高速で起こる比較的簡単な分子性物質についても、前駆融解領域における構造変化やダイナミクスと相変化の関係を明らかにすることが出来る見通しがたった。コンフォメーションの変化と複雑な水素結合の組み替えが相変化と協同的に起こる glycerol を取り上げる。

c) 自己組織化の熱現象としての解明

メゾスケールで起こっている自己組織化、例えば、ナノ粒子の形成・成長過程、ソフトマテリアルの自己組織化、パターン形成、溶液中のクラスター生成や構造形成などを熱現象として、定量的に捕らえることを試みる。これらの現象は、今回立ち上げる小角 X 線散乱との同時測定により、新規な情報が得られると期待される。

d) イオン液体や分子性液体の水溶液の微分的溶液科学の展開

4. 研究成果

(1)「相変化に伴う熱現象」と(2)「2種の液体や超臨界流体の混じり合いによって起こる熱現象」に分けて纏める。

(1)「相変化に伴う熱現象」

イオン液体は様々な特異的な性質を示す。特に熱物性はユニークである。相転移に焦点をあて、当初、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研究を行った。1-Alkyl-3-methyl-imidazolium ($C_n\text{mim}$)カチオンのハロゲン化物について、3つのユニークな熱現象(振動的凝固・融解, 間歇的結晶化, 可逆的融解・結晶化)を発見した。これらの特異的な現象は、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した。また、コンフォメーションのフレキシビリティ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。振動的凝固・融解および間歇的結晶化は、本研究の超高感度熱量計で初めて検出可能となった世界初のデータである。

イオン液体を構成する代表的カチオンである $C_n\text{mim}$ カチオンに加え、imidazolium 環2位の位置の炭素についている水素をメチル基に変えた試料 ($C_nC_1\text{mim}$ カチオンを含むイオン液体)に発展させた。この位置の水素はプロトン性が強く、これをメチル基に変えるこ

とにより、大きな物性変化が生じる。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、 $C_n\text{mim}$ および $C_nC_1\text{mim}$ カチオンで比較した。置換したメチル基が他のアルキル基(主にブチル基)の運動を制限する以上に、対アニオンの位置を制限することによって、熱物性の違いが生じることが明らかになった。

研究開始2年目に、超高感度熱測定装置を -100°C まで測定できるように改造した。この装置性能の向上化により、多くの試料の結晶化やガラス転位現象も測定できるようになった。超高感度である特性を生かして、今までは観測されていない結晶化時やガラス転位時に起こる新規な現象を観測することに成功した。例えば、降温過程では結晶化せずガラスとなり、昇温過程で結晶化が起こる奇妙な試料を多数見つけた。その代表が $[C_4\text{mim}]\text{Br}$ である。 $[C_4\text{mim}]\text{Br}$ の結晶化挙動を詳細に調べ、結晶化時に起こるソフト化を観測した。

$[C_4\text{mim}]\text{Br}$ は液体状態から温度を下げると結晶にならず、ガラスのように固化する。この状態から温度を上げていくと結晶化が起こり、さらに温度を上げると結晶から液体に相転位する。ガラスから結晶に変化する際、一端ソフト化(液化)が起こる。本試料はイオンのコンフォメーションを変えて結晶になる。この構造変化のために自由に動けることが必要で、これが液化として観測される。非常に奇妙な現象で、新たな結晶化の機構解明に興味深い実験例を提示している。 $[C_4\text{mim}]\text{Br}$ を試料とした超高感度熱測定で、その結晶化挙動で始めて発見した新規な現象(ガラス状態 \rightarrow ソフト化(液化) \rightarrow 結晶化)は、相変化時にコンフォメーションの変化を伴っている他のイオン液体でも共通にみられる現象であることを示した。

上記の熱現象をダイナミクスの立場から、NMRの縦緩和および横緩和時間 (T_1 , T_2) で検討した。低周波数NMRを用いて、 ^1H から $C_n\text{mim}$ カチオンおよび $C_nC_1\text{mim}$ カチオン全体のダイナミクスを、高分解能NMRを用いて ^{13}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状態を見つけた。炭素の運動性の観点から、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を明らかにした。また、20~30分もかかる非常に

ゆっくりとした1次の相転移をNMRのFID信号から見つけた

2年度目より、NMRの緩和時間測定も精力的に行い、カチオンを構成する個々の原子の動きがどのように相変化を引き起こすかをダイナミクスの観点からも明らかにした。構成イオンの極性の高い部分と非極性部分の動的挙動が大きく異なり、このアンバランスなダイナミクスがイオン液体の相挙動を複雑にしていることが明らかになった。

4年度目は、低磁場NMR装置に¹⁹F用のプローブをメーカーと共に開発し、イオン液体のアニオンの主な構成元素であるの緩和時間測定を可能とした。これにより、アニオンの動的挙動が相挙動に及ぼす過程を観測する道が開けた。これまでのカチオンのダイナミクスと熱挙動の議論をさらにアニオンのダイナミクスも含めることが出来るようになり、イオン液体の熱挙動に対する理解が大きく進んだ。

(2) 「2種の液体や超臨界流体の混じり合いによって起こる熱現象」

2つの液体を混ぜると、その相互作用により熱の出入りが観測される。混合する量を無限少にしていくことにより（微分的熱力学）、1分子と周囲とのエネルギー的相互作用を明らかにできる。エチルアルコール及びジメチルスルフォキシドの水溶液系に適用し、水と有機物との相互作用の典型である疎水性及び親水性を定量的に表した。

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）

(1) 雑誌論文 原著論文（計42件）

① “Effects of Tetramethyl- and Tetraethyl-Ammonium Chloride on H₂O: Calorimetric and Near Infrared Spectroscopic Study.”

Y. Koga, F. Sebe, K. Nishikawa
J. Phys. Chem. B **117**, 877–883 (2013). (査読有)
DIO: 10.1021/jp3082744

② “A comparative study of rotational dynamics of PF₆⁻ anions in the crystals and liquid states of butyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate: Results from ³¹P NMR spectroscopy.”

T. Endo, H. Murata, M. Imanari, N. Mizhisima, H. Seki, S. Sen, K. Nishikawa

J. Phys. Chem. B **117**, 326–332 (2013). (査読有)
DIO: 10.1021/jp310947c

③ “Linker-length dependence of reorientational dynamics and viscosity of bis(imidazolium)-based ionic liquids incorporating bis(trifluoromethanesulfonyl)-amide anions.”

T. Mandai, M. Imanari, K. Nishikawa
Chem. Phys. Lett., **543**, 72–75 (2012). (査読有)
DIO: 10.1016/j.cplett.2012.06.026

④ “Small-angle X-ray scattering study on the fluctuations of supercritical aqueous solution of n-pentane along the critical isotherm of water.”

T. Morita, H. Murai, S. Kase, K. Nishikawa
Chem. Phys. Lett., **543**, 68–71 (2012). (査読有)
DIO: 10.1016/j.cplett.2012.06.009

⑤ “Small-angle X-ray Scattering Measurements of Ionic Liquids pressurized with Carbon Dioxide Using High-Pressure Ti Sample Holder: Butyl-3-methylimidazolium bis(trifluoromethylsulfonyl) Amide Mixtures up to 22 MPa.”

T. Morita, 3名略, K. Nishikawa
Jpn. J. Appl. Phys., **51**, 076703-1~6 (2012).
(査読有) DIO: 10.1143/JJAP.51.076703

⑥ “Effects of ethanol and dimethylsulfoxide on the molecular organization of H₂O as probed by 1-propanol.”

T. Morita, P. Westh, K. Nishikawa, Y. Koga
J. Phys. Chem. B **116**, 7328–7333 (2012).
(査読有) DIO: 10.1021/jp303619q

⑦ “Linker-Length Dependence of Crystal Structures and Thermal Properties of Bis-imidazolium Salts.”

T. Mandai, H. Masu, H. Seki, K. Nishikawa
Bull. Chem. Soc. Jpn., **85**, 599–605 (2012).
(査読有) DIO: 10.1246/bcsj.20120018

⑧ “Dynamical scaling analysis using the Lillie Number for vitrification of deeply supercooled glycerol.” (査読有)

K. Sou, K. Nishikawa, Y. Koga, K. Tozaki
J. Non-Cryst. Solids, **358**, 1313–1318 (2012).
DIO: 10.1016/j.imoncrsol.2012002.036

⑨ “Ultraslow Dynamics at Crystallization of a Room-Temperature Ionic Liquid, 1-Butyl-3-methylimidazolium Bromide.”

M. Imanari, K. Fujii, T. Endo, H. Seki, K. Tozaki, K. Nishikawa (査読有)
J. Phys. Chem. B **116**, 3991–3997 (2012).
DIO: 10.1021/jp300722j

⑩ “NMR Study of Cation Dynamics in Three Crystalline States of Butyl-3-Methylimidazolium Hexafluorophosphate Exhibiting Crystal

- Polymorphism.” T. Endo, H. Murata, M. Imanari, N. Mizushima, H. Seki, K. Nishikawa *J. Phys. Chem. B* **116**, 3780–3788 (2012).
(査読有) DIO: 10.1021/jp300636s
- ⑪ “Spectrum of Excess Partial Molar Absorptivity. II: An NIR Study of Aqueous Na-Halides.” F. Sebe, K. Nishikawa, Y. Koga *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **14**, 4433–4439 (2012).
(査読有) DIO: 10.1039/c2cp23255c
- ⑫ “Effects of Cyclic-Hydrocarbon Substituents and Linker Length on Physicochemical Properties and Reorientational Dynamics of Imidazolium-Based Ionic Liquids.” T. Mandai, A. Matsumura, M. Imanari, K. Nishikawa *J. Phys. Chem. B*, **116**, 2090–2095 (2012).
(査読有) DIO: 10.1021/jp211114h
- ⑬ “Comparison between Cycloalkyl- and n-Alkyl-Substituted Imidazolium-Based Ionic Liquids in Physicochemical Properties, Reorientational Dynamics.” T. Mandai, H. Masu, M. Imanari, K. Nishikawa *J. Phys. Chem. B*, **116**, 2059–2064 (2012).
(査読有) DIO: 10.1021/jp210273q
- ⑭ “Cation and Anion Dynamics in Supercooled and Glass States of the Ionic Liquid 1-Butyl-3-methylimidazolium Hexafluorophosphate: Results from ^{13}C , ^{31}P and ^{19}F NMR Spectroscopy.” T. Endo, S. Widgeon, S. Sen, K. Nishikawa *Phys. Rev. B* **85**, 054307-1~ -9 (2012). (査読有) DIO: 10.11103/PhysRevB.85.054307
- ⑮ “Crystal polymorphism of a room-temperature ionic liquid, 1,3-dimethylimidazolium hexafluorophosphate: Calorimetric and structural studies of two crystal phases having melting points of ~50K difference.” T. Endo, T. Morita, and K. Nishikawa *Chem. Phys. Lett.*, **517**, 162–165 (2011).
(査読有) DIO: 10.1016/j.cplett.2011.10.040
- ⑯ “Correlation between Hydrocarbon Flexibility and Physicochemical Properties for Cyclohexyl-imidazolium Based Ionic Liquids Studied by ^1H and ^{13}C NMR.” T. Mandai, M. Imanari, and K. Nishikawa *Chem. Phys. Lett.*, **507**, 100–104 (2011).
(査読有) DIO: 10.1016/j.cplett.2011.03.075
- ⑰ “High-Resolution Calorimetry on Thermal behavior of Glycerol (1): Glass transition, crystallization and Melting, and Discovery of a Solid-Solid transition.” K. Sou, K. Nishikawa, Y. Koga, K. Tozaki *Chem. Phys. Lett.*, **506**, 217–220 (2011).
(査読有) DIO: 10.1016/j.cplett.2011.03.043
- ⑱ “Effects of Methylation at Position 2 of Cation Ring on Rotational Dynamics of Imidazolium-based Ionic Liquids Investigated by NMR Spectroscopy: $[\text{C}_4\text{mim}]\text{Br}$ vs $[\text{C}_4\text{C}_1\text{mim}]\text{Br}$.” T. Endo, M. Imanari, H. Seki, K. Nishikawa *J. Phys. Chem. A* **115**, 2999–3005 (2011).
(査読有) DIO: 10.1021/jp200635h
- ⑲ “Is a Methyl Group always Hydrophobic? : Hydrophilicity of Trimethylamine-N-oxide, Tetramethyl Urea and Tetramethylammonium Ion.” Y. Koga, P. Westh, K. Nishikawa *J. Phys. Chem. B* **115**, 2995–3002 (2011).
(査読有) DIO: 10.1021/jp108347b
- ⑳ “Effects of Methylation at the 2 Position of the Cation Ring on Phase Behaviors and Conformational Structures of Imidazolium-Based Ionic Liquids.” T. Endo, T. Kato, K. Nishikawa *J. Phys. Chem. B* **114**, 9201–9208 (2010).
(査読有) DIO: 10.1021/jp104123v
- ㉑ “Microscopic Study of Ionic Liquid- H_2O Systems: Alkyl-Group Dependence of 1-Alkyl-3-Methylimidazolium Cation.” T. Masaki, K. Nishikawa, H. Shirota *J. Phys. Chem. B* **114**, 6323–6331 (2010).
(査読有) DIO: 10.1021/jp1017967
- ㉒ “NMR study on relationships between reorientational dynamics and phase behaviour of room-temperature ionic liquids: 1-alkyl-3-methylimidazolium cations.” M. Imanari, 3 名略, K. Nishikawa *Phys. Chem. Chem. Phys.* **12**, 2959-2967 (2010)
(査読有) DIO: 10.1039/b922931k
- ㉓ “Phase Behaviors of Room Temperature Ionic Liquid Linked with Cation Conformational Changes: 1-Butyl-3-methylimidazolium Hexafluorophosphate.” T. Endo, T. Kato, K. Tozaki, K. Nishikawa *J. Phys. Chem. B* **114**, 407-411 (2010).
(査読有) DIO: 10.1021/jp909256j
- ㉔ “Hydrophobicity/Hydrophilicity of 1-Butyl-2,3-dimethyl and 1-Ethyl-3-methylimidazolium Ions: Towards Characterization of Room Temperature Ionic Liquids.” H. Kato, 2 名略, K. Nishikawa, Y. Koga

J. Phys. Chem. B, **113**, 14754-14760 (2009).

(査読有) DIO: 10.1021/jp907804a

②⑤ “Thermodynamic Study on Phase Transitions of Poly(benzyl methacrylate) in Ionic Liquids Solvent.” T. Ueki, 4 名略, T. Morita,

K. Nishikawa, M. Watanabe

Pure & Applied Chem. **81**, 1829-1841 (2009).

(査読有) DIO: 10.1351/PAC-CON-08-09-04

②⑥ “Spectrum of Excess Partial Molar Absorptivity I : Near Infrared Depectroscopic Study of Aqueous Acetonitrile and Acetone.”

Y. Koga, F. Sebe, 3 名略, K. Nishikawa

J. Phys. Chem. B **113** 11928-11935 (2009).

(査読有) DIO: 10.1021/jp901934c

②⑦ “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, K. Tozaki

Bull. Chem. Soc. Jpn. **82** (7), 806-812 (2009).

(査読有) DIO: 10.1246/bcsj.82.806

(2) 雑誌論文 解説・総説(計 6 件)

① 「イオン液体のユニークな熱物性」

西川恵子 (査読有)

真空 Vol. 56, No. 2, 47-53 (2013).

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jvsj2/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jvsj2/56/2/56_12-RV-038/_pdf)

[56/2/56_12-RV-038/_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jvsj2/56/2/56_12-RV-038/_pdf)

② 「ゆらぎで観た溶液科学」

西川恵子, 森田剛 (査読有)

Molecular Science 6, A0054-1~9 (2012).

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/molsci/6](https://www.jstage.jst.go.jp/article/molsci/6/1/6_A0054/_article/-char/ja/)

[/1/6_A0054/_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/molsci/6/1/6_A0054/_article/-char/ja/)

③ 「イオン液体はなぜ結晶化しにくいのか-相転移を司る超低速ダイナミクスに迫る-」

今成司, 関宏子, 西川恵子 (査読無し)

現代化学 9 月号 pp. 30-33 (2010) (東京科学同人) DOI: 無し

(3) 学会発表 (計 82 件)

① 「ゆらぎの構造化学の開拓と展開」

西川恵子 (日本化学会賞受賞講演)

日本化学会第92回春期年会(慶應義塾大学日吉キャンパス) 2012年3月26日

② “Phase Behaviors of Ionic Liquids ---Unique Macroscopic Phenomena Caused by Microscopic Structural Changes and Cooperative Slow Dynamics--- ”

K. Nishikawa (Keynote Speaker)

4th International Congress on Ionic Liquids (Washington DC, USA) 16/June/2011)

③ “Unique Phenomena Caused by Microscopic Structural Changes of Ions”

Keiko Nishikawa (Invited)

239th American Chemical Society National Meeting & Exposition; Symposium on “Physical Chemistry of Ionic Liquids” San Francisco USA (2010, March 25)

④ 「熱物性からみたイオン液体-ミクロな構造変化をもたらすユニークな物性-」
西川恵子 (特別講演)

第 32 回溶液化学シンポジウム (新潟, 2009 年 11 月 19 日)

⑤ 「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-」

西川恵子 (招待講演)

第 3 回分子科学会(名古屋大学, 2009 年 9 月 21 日)

(4) 図書(計 1 件)

・「イオン液体の科学-新世代液体への挑戦-」

西川恵子, 大内幸雄, 伊藤敏幸, 渡邊正義

大野弘幸 編著 丸善

2012 年 12 月出版 総ページ数: 374 ページ

(5) 産業財産権

無し

(6) その他 ホームページ

西川研究室 構造化学研究室

<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 (NISHIKAWA KEIKO)

千葉大学・大学院融合科学研究科・教授
研究者番号: 60080470

(2) 研究分担者 無し

(3) 連携研究者

森田 剛 (MORITA TAKESHI)

千葉大学・大学院融合科学研究科・助教
研究者番号: 80332633

東崎 健一 (TOZAKI KEN-ICHI)

千葉大学・教育学部・教授

研究者番号: 30102031