

## 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 26日現在

機関番号：12501

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2009年度～2012年度

課題番号：21685001

研究課題名（和文）イオン液体の分極と双極子の分子間相互作用：イオン液体を包含する溶液論を目指して

研究課題名（英文）Intermolecular interactions for polarizability and dipole moment in ionic liquid: To construct solution theory including ionic liquid

研究代表者

氏名（ローマ字）：城田 秀明 (Hideaki Shirota)

所属機関・部局・職：千葉大学・大学院融合科学研究科・准教授

研究者番号：00292780

研究成果の概要（和文）：本研究課題の目的は、イオン液体における分子間振動ダイナミクスを通してイオン液体の微視的分子間相互作用や構造を詳細に検討することである。凝縮相の分子間振動バンドは低振動数領域（約  $50\text{ cm}^{-1}$  以下の領域）に現れるため、低振動数領域の分光手法を使う必要がある。本研究では、単一のレーザー光源を用いたものとしては世界最高レベルの観測領域と信号感度を持つフェムト秒ラマン誘起カー効果分光装置を作成することに成功し、イオン液体に現れる分子間振動バンドについて分子レベルでの解釈を与えることができた。特に、(1) 非芳香族性イオン液体と芳香族性イオン液体の相違、(2) 重原子置換効果の一般性（カチオンとアニオン、芳香族と非芳香族など）、(3) イオン液体と分子液体との相違、(4) ジカチオン型イオン液体の特異性、について新しい知見を得ることに成功し、これらについて書籍の1章 (*Ionic Liquids: Theory, Properties, New Approaches, Chapter 9*) および総説 (*ChemPhysChem*, **2012**, *13*, 1638. VIP (Very Important Paper)に選定) にまとめることができた。また、この研究課題に関連して、国内外のグループとの共同研究に発展した。

研究成果の概要（英文）：The aim of this research project includes understanding the microscopic intermolecular interaction and structure of ionic liquid through the intermolecular vibration. Since the intermolecular vibrational band in condensed phases appears in the low-frequency region below  $50\text{ cm}^{-1}$ , low-frequency spectroscopic techniques are essential to observe the intermolecular vibrations. In this project, it is successful to build a very high spec femtosecond Raman-induced Kerr effect spectroscopy setup as a single light source apparatus which has a wide observable frequency region and high signal to noise ratio. Using this spectroscopy setup, we successfully reveal the unique natures of the intermolecular vibrational band of ionic liquid at molecular level: (1) similarity/difference between aromatic and nonaromatic ionic liquids, (2) generality of heavy atom substitution (cation vs. anion and aromatic vs. nonaromatic), (3) similarity/difference between ionic liquid and (neutral) molecular liquid, and (4) dicationic vs. monocationic ionic liquids. These results have been summarized in a book chapter (*Ionic Liquids: Theory, Properties, New Approaches, Chapter 9*) and a review article (*ChemPhysChem*, **2012**, *13*, 1638: classified as VIP (Very Important Paper)). Also, we have started some collaboration works with domestic and international groups through this research project.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	11,200,000	3,360,000	14,560,000
2010年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
2011年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2012年度	2,000,000	600,000	2,600,000
年度			
総計	21,300,000	6,390,000	27,690,000

研究分野：化学

科研費の分科・細目：物理化学

キーワード：分子分光，イオン液体，分子ダイナミクス

### 1. 研究開始当初の背景

近年、室温イオン液体が注目を浴びている。これは大気中で安定なイオン液体が発明されたのが1992年であり比較的近年であること、従来の液体や塩とは異なる性質を示すためである。イオン液体の低融点を示す塩であるということと、大気条件下で蒸気圧がほとんどない液体であるというユニークな特徴は、電解液への応用や有機合成の代替溶媒など広く応用されることが産業界からの期待が大きく、近年注目を集めている要因である。

一方で、イオン液体に関する基礎科学的な研究は、応用研究に比べて立ち遅れている。例えば、本研究のターゲットであるイオン液体の分子間振動周波数領域をカバーした分光学的な研究論文報告は、光ラマン誘起カー効果分光（別名光カー効果分光）によるものが申請者らのもの4件を含めて10件程度（米国2大学と英国1大学）であり、ケーススタディ的な報告のみであった。また、テラヘルツ時間領域分光法によるものは、現在までに3件しかなかった。

イオン液体の分子間振動の研究は2002年になってから開始されたばかりであり、申請者らによる現段階でのイオン液体の分子間振動と相互作用に関する研究をまとめた総説はあるものの、イオン液体の分子間振動や分子レベルでの分子間相互作用、またバルク物性との関連性などの全体像の理解には未だ至っていない。イオン液体を包含して現象や物性などを説明できる溶液論を確立することが望まれていると同時に、イオン液体の特異性を明らかにする必要がある。

### 2. 研究の目的

本研究課題の目的は、特殊な分子間相互作用によって室温で液体となる新しいタイプの塩「室温イオン液体」の分子間振動ダイナミクスをフェムト秒分光法で観測し、微視的な分子間相互作用を解釈することにより、イオン液体を包含する新しい液体論・溶液論の基礎を作ることである。

上記で述べたように、イオン液体の分子間振動に関する報告は非常に少ないため、イオン液体を理解するためには、少しでも多くのデータかつ系統的な理解が可能なデータセットの選定が必要不可欠である。そのために、測定時間短縮を目指して、フェムト秒ラマン誘起カー効果分光装置の高感度化が必要で

ある。また多くのデータを収集する必要がある一方で、系統的なサンプルを比較することにより、イオン液体が持つ特異性についての分子レベルでの物理化学的な理解を行う必要がある。そこで、本研究プロジェクトの期間において、以前の科研費における研究プロジェクト（2007-8年度）で明らかにした重原子置換効果についてその一般性を確認することをはじめ、芳香族性の影響、分子液体とイオン液体の相違、ジカチオン型とモノカチオン型イオン液体の相違について、特に力点をおいて研究を展開することを目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究課題では、微視的な分子間相互作用と構造が直接的に反映する分子間振動が現れる低振動数領域のスペクトルを得るために、フェムト秒ラマン誘起カー効果分光を用いた。この分光装置は当該研究室で作成したものであり、本研究プロジェクトで信号の高感度化に成功したものである（改良前の測定には1サンプルの測定に約1.5-2日必要であったのが、改良後は約1日で十分になった）。また、イオン液体の本質を明らかにすべく、必要に応じて、市販で入手不可能なサンプルについても合成を行い、重原子置換効果、ジカチオン型イオン液体の特異性、イオン液体における芳香族性の特異性について、独自性のある検討を行った。またイオン液体と中性分子液体との混合溶液についても展開し始めた。さらに、イオン液体を複眼的に考察するために、X線回折、分子動力学シミュレーション、NMRを使った共同研究にも発展した。

### 4. 研究成果

本研究プロジェクト期間中で、現在、日本国内で唯一稼働しているフェムト秒ラマン誘起カー効果分光装置の検出信号の高感度化（約1.5倍程度）を達成することができた。これは、光源により安定なフェムト秒レーザーを用いたことによる効果が最も大きい。この改善により、信号強度が小さいサンプルについても測定が可能になり、かつ、測定時間を短縮した分光システムとなった。一方で、時間分解能は若干悪くなった（約1.1倍程度）。この点に関しては、より高性能の光学部品や光路長の短い偏光子を用いることで改善できる可能性があり、より高性能の分光システムのための今後の課題としたい。

ターゲットのイオン液体に関して、非常に広範囲の分野・項目に研究を展開することに成功した。第一は、非芳香族性イオン液体への展開である (*J. Phys. Chem. B* **2010**, *114*, 9400 など)。エーテル基を導入した新規のアンモニウム系およびホスフォニウム系イオン液体を開発することに成功し、このイオン液体は非常に粘度を低下させる効果があることを確認した。また、ホスフェニウム系イオン液体の方が、粘度が低くなることも明らかにしている。フェムト秒ラマン誘起カー効果による分極率の異方性変化に相当する低振動数から、アンモニウムとホスフォニウムの違いは分子間相互作用がホスフォニウムの方が弱くなることで、またエーテル基の効果についてはエーテル基の柔らかさもしくは絡み合いの少なさによるものであることが明らかになった。また、この結果は、これまでに、当研究者が芳香族性イオン液体で観測された重原子置換効果が非芳香族イオン液体でも現れる、イオン液体において普遍的な効果であることを示したものとなった。このイオン液体の重原子置換効果については、書籍「*Ionic Liquids: Theory, Properties, New Approaches*」の第9章にまとめることができた。

第二は、モノカチオン型イオン液体とジカチオン型イオン液体の比較により、これまで分子レベルでジカチオン型イオン液体の特異性を明らかにすることに成功したことである。この系については、包括的に静的な物性値と合成法をまとめた研究 (*J. Chem. Eng. Data* **2011**, *56*, 2453)、フェムト秒光カー効果分光による微視的相互作用と構造を明らかにした研究 (*J. Phys. Chem. B* **2011**, *115*, 10860)、さらに共同研究に基づいた分子動力学シミュレーションによる運動性の詳細な考察の研究 (*J. Phys. Chem. B* **2013**, *117*, 1136)、と系統的に研究を進めることができた。このような、合成、静的物性、超高速ダイナミクス、理論計算と一つの系について一貫して展開した研究は非常に希少である。

第三番目として、芳香族性イオン液体と非芳香族性イオン液体の根本的な違いを見出したことである。イオン液体についても分極率変化に由来する低振動数領域のスペクトルバンドの特性周波数（一次モーメント）が線形的にバルク物性（表面張力と密度の商の平方根）と相関があることを初めて見出した。興味深いのは、この相関が芳香族性イオン液体と非芳香族性イオン液体で異なることである。通常分子液体については、芳香族、非芳香族にかかわらず、一つの関係が見られることから、この結果は微視的な構造と分極変化に反映する分子間相互作用が、芳香族性イオン液体に現れる不均一構造に由来していることを示すものである。この結果は、通

常分子液体において適用できる溶液論をさらにイオン液体に適用するには、その枠組みを拡張しなければならないことを示すものである。この研究成果については、*ChemPhysChem* のイオン液体特集号に掲載され、VIP (Very Important Paper) に選ばれた。

また、第四番目として、純粋なイオン液体に関する研究のみならず、イオン液体と分子液体の混合溶液へ、研究を発展させることができた。イオン液体（特に芳香族性イオン液体）において、微視的な不均一構造が物性などに大きく影響を与えるが、イオン液体を媒体として考える際に、溶質や溶媒がイオン液体内でどのような微環境下にあるのかを明らかにする上で、また微視的な分子間相互作用を検討する上で非常に重要なものとなる。これまでに、水 (*J. Phys. Chem. B* **2012**, *116*, 13765) とベンゼン (*J. Phys. Chem. B* 投稿中) の二つの溶媒について検討したが、それぞれ、イオン液体内での微視的構造と分子間相互作用が顕著に異なることを示すことに成功している。このように、分子間振動スペクトルを通して、イオン液体の液体としての特徴をいくつも明らかにすることができた。また、イオン液体の特徴を明らかにするために、副次的な成果ではあるが、新規イオン液体の開発にも成功した。

さらに、当研究室で開発した新規イオン液体やフェムト秒光カー効果分光装置により、国内外の大学・研究機関（米国ニュージャージー州立大学、ポーランド国シレジア大学、インド国 S.N. ボーズ基礎科学研究所、分子科学研究所、名古屋大学など）との共同研究に発展した。これらの共同研究の幾つかは今後も継続することが見込まれている。

## 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 21 件）

- ① H. Y. Lee, H. Shirota, E. W. Castner, Jr. Differences in Ion Interactions for Isoelectronic Ionic Liquid Homologs. *J. Phys. Chem. Lett.* **2013**, *4* (9), 1477 – 1483. 査読有.
- ② T. Ishida, H. Shirota. Dicationic versus Monocationic Ionic Liquids: Distinctive Ionic Dynamics and Dynamical Heterogeneity. *J. Phys. Chem. B* **2013**, *117* (4), 1136–1150. 査読有.
- ③ H. K. Kashyap, C. S. Santos, R. P. Daly, J. J. Hettige, N. S. Murthy, H. Shirota, E. W.

- Castner, Jr., C. J. Margulis. How does the Ionic Liquid Organizational Landscape Change when Nonpolar Cationic Alkyl Groups are Replaced by Polar Isoelectronic Diethers? *J. Phys. Chem. B* **2013**, *117* (4), 1130–1135. 査読有.
- ④ 城田秀明. フェムト秒ラマン誘起カー効果分光による液体・溶液のテラヘルツ領域の分子運動の観測. *日本赤外線学会誌*, **2012**, *22* (1), 40–49. 査読有. 「赤外領域における液体, 生体高分子の分光測定」特集号 (招待).
- ⑤ H. Shirota. Comparison of Low-Frequency Spectra between Aromatic and Nonaromatic Cation Based Ionic Liquids Using Femtosecond Raman-Induced Kerr Effect Spectroscopy. *ChemPhysChem*, **2012**, *13* (7), 1638–1648. 査読有. 「イオン液体」特集号 (招待). VIP (Very Important Paper) に選定.
- ⑥ H. Shirota, R. Biswas. Intermolecular/Interionic Vibrations of 1-Methyl-3-*n*-octylimidazolium Tetrafluoroborate Ionic Liquid and H<sub>2</sub>O Mixtures. *J. Phys. Chem. B* **2012**, *116* (46), 13765–13773. 査読有.
- ⑦ L. Hawelek, H. Shirota, J. Kusz, K. Grzybowska, M. Mierzwa, M. Paluch, A. Burian, J. Ziolo. High-Pressure Crystallization of 1-Methyl-3-trimethylsilylmethylimidazolium Tetrafluoroborate Ionic Liquid. *Chem. Phys. Lett.* **2012**, *546*, 150–152. 査読有.
- ⑧ A. Triolo, O. Russina, R. Caminiti, H. Shirota, H. Y. Lee, C. S. Santos, N. S. Murthy, and E. W. Castner, Jr. Comparing Intermediate Range Order for Alkyl- vs. Ether-Substituted Cations in Ionic Liquids. *Chem. Commun.* **2012**, *48* (41), 4959–4961. 査読有.
- ⑨ T. Yamaguchi, K. Mikawa, S. Koda, H. Fukazawa, H. Shirota. Shear Relaxation of Ammonium- and Phosphonium-Based Ionic Liquids with Oxyethylene Chain. *Chem. Phys. Lett.* **2012**, *521*, 69–73. 査読有.
- ⑩ H. Shirota. Intermolecular Vibrations and Diffusive Orientational Dynamics of C<sub>s</sub> Condensed Ring Aromatic Molecular Liquids. *J. Phys. Chem. A* **2011**, *115* (50), 14262–14275. 査読有.
- ⑪ G. Jarosz, M. Mierzwa, J. Ziolo, M. Paluch, H. Shirota, K. L. Ngai. Glass Transition Dynamics of Room Temperature Ionic Liquid: 1-Methyl-3-trimethylsilylmethylimidazolium Tetrafluoroborate. *J. Phys. Chem. B* **2011**, *115* (44), 12709–12716. 査読有.
- ⑫ S. Yamaguchi, K. Mazur, I. A. Heisler, H. Shirota, K. Tominaga, S. R. Meech. Low-frequency Modes of the Benzoic Acid Dimer in Chloroform Observed by the Optical Kerr Effect. *J. Chem. Phys.* **2011**, *135* (13), 134504/1–9. 査読有.
- ⑬ H. Shirota, T. Ishida. Microscopic Aspects in Dicationic Ionic Liquids through the Low-Frequency Spectra by Femtosecond Raman-Induced Kerr Effect Spectroscopy. *J. Phys. Chem. B* **2011**, *115* (37), 10860–10870. 査読有.
- ⑭ H. Shirota, T. Kato. Intermolecular Vibrational Spectra of C<sub>3v</sub> CXY<sub>3</sub> Molecular Liquids, CHCl<sub>3</sub>, CHBr<sub>3</sub>, CFB<sub>3</sub>, and CBrCl<sub>3</sub>. *J. Phys. Chem. A* **2011**, *115* (32), 8797–8807. 査読有.
- ⑮ T. Kato, H. Shirota. Intermolecular Vibrational Modes and Orientational Dynamics of Cooperative Hydrogen-Bonding Dimer of 7-Azaindole in Solution. *J. Chem. Phys.* **2011**, *134* (16), 164504/1–9. 査読有.
- ⑯ H. Fukazawa, T. Ishida, H. Shirota. Ultrafast Dynamics in 1-Butyl-3-Methylimidazolium-Based Ionic Liquids: A Femtosecond Raman-Induced Kerr Effect Spectroscopic Study. *J. Phys. Chem. B* **2011**, *115* (16), 4621–4631. 査読有.
- ⑰ H. Shirota, T. Mandai, H. Fukazawa, T. Kato. Comparison between Dicationic and Monocationic Ionic Liquids: Liquid Density, Thermal Properties, Surface Tension, and Shear Viscosity. *J. Chem. Eng. Data* **2011**, *56* (5), 2453–2459. 査読有.
- ⑱ H. Shirota, H. Fukazawa, T. Fujisawa, J. F. Wishart. Heavy Atom Substitution Effects in Non-Aromatic Ionic Liquids: Ultrafast

- Dynamics and Physical Properties. *J. Phys. Chem. B* **2010**, *114* (29), 9400–9412. 査読有.
- ⑱ T. Masaki, K. Nishikawa, H. Shirota. Microscopic Study of Ionic Liquid-H<sub>2</sub>O Systems: Alkyl-Group Dependence of 1-Alkyl-3-Methylimidazolium Cation. *J. Phys. Chem. B* **2010**, *114* (19), 6323–6331. 査読有.
- ⑲ T. Fujisawa, K. Nishikawa, H. Shirota. Comparison of Interionic/Intermolecular Vibrational Dynamics between Ionic Liquids and Concentrated Electrolyte Solutions. *J. Chem. Phys.* **2009**, *131* (24), 244519/1–14. 査読有.
- ⑳ H. Shirota, T. Fujisawa, H. Fukazawa, K. Nishikawa. Ultrafast Dynamics in Aprotic Molecular Liquids: A Femtosecond Raman-Induced Kerr Effect Spectroscopic Study. *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **2009**, *82* (11), 1347–1366. 査読有.
- [学会発表] (計 26 件)
- ① Hideaki Shirota, Takao Fukuda, Tatsuya Kato. Probing Dimerization of 7-Azaindol in Solutions by Femtosecond Raman-Induced Kerr Effect Spectroscopy. *XVIth International Conference on Time-Resolved Vibrational Spectroscopy*. 2013 年 5 月 23 日. Beppu, Japan.
- ② Hideaki Shirota, Ranjit Biswas. Microscopic Aspect of Ionic Liquid and Water Mixtures Probed by Femtosecond Raman-Induced Kerr Effect Spectroscopy. *2012 EMLG/JMLG Annual Meeting*. 2012 年 9 月 5 日. Eger, Hungary.
- ③ 城田秀明. フェムト秒ラマン誘起カー効果分光法でみるテラヘルツ領域の分子運動—溶液中の 7-アザインドールを例にして—. *アジア連携分子研研究会*. 2012 年 6 月 2 日. 岡崎.
- ④ Hideaki Shirota. Low-Frequency Vibrational Dynamics in Liquids: Molecular Liquid vs. Ionic Liquid. *Mini Discussion Meeting on Dynamics & Relaxations in Complex Systems*. 2012 年 3 月 3 日. Chiba. 組織委員.
- ⑤ Tatsuya Kato, Hideaki Shirota. Intermolecular Dynamics of 7-Azaindole in Solutions by means of Femtosecond Raman-Induced Kerr Effect Spectroscopy. *International Conference on Statistical Mechanics of Liquids: From Water to Biomolecules*. 2012 年 2 月 13 日. Okazaki, Japan.
- ⑥ Tatsuya Kato, Hideaki Shirota. Ultrafast Dynamics in Room Temperature Ionic Liquids Studied by Femtosecond Raman-Induced Kerr Effect Spectroscopy. *11th Trombay Symposium on Radiation & Photochemistry*. 2012 年 1 月 4 日. Mumbai, India. 招待講演.
- ⑦ 三河健一, 山口毅, 香田忍, 深澤宏紀, 城田秀明. 粘性緩和法による側鎖にエーテル基を含むアンモニウムおよびホスホニウム系イオン液体の研究. *第 5 回分子科学討論会*. 2011 年 9 月 22 日. 札幌.
- ⑧ Hideaki Shirota. Interionic Vibrations of Ionic Liquids Probed by Femtosecond Raman-Induced Kerr Effect Spectroscopy. *2011 EMLG/JMLG Annual Meeting*. 2011 年 9 月 15 日. Warsaw, Poland. 総会講演.
- ⑨ 深澤宏紀, 城田秀明. 芳香族イオン液体のイオン間相互作用とダイナミクス. *日本化学会第 91 回春季年会*. 2011 年 3 月 27 日. 横浜.
- ⑩ 加藤達也, 城田秀明. 溶液中における 7-アザインドール会合体の超高速ダイナミクス. *日本化学会第 91 回春季年会*. 2011 年 3 月 27 日. 横浜.
- ⑪ Hideaki Shirota. Intermolecular Dynamics in Liquids Studied by A Third-Order Nonlinear Spectroscopy. *8th International Conference of Computational Methods in Science and Engineering*. 2010 年 10 月 5 日. Kos, Greece. 招待講演.
- ⑫ Tatsuya Kato, Hideaki Shirota. Intermolecular Vibrational Dynamics in Cooperative Hydrogen-Bonding Complex: 7-Azaindole. *3rd Asia Pacific Symposium on Radiation Chemistry and 10th Trombay Symposium on Radiation & Photochemistry*. 2010 年 9 月 15 日. Lonavala, India. ポスター賞.
- ⑬ Hiroki Fukazawa, Hideaki Shirota. Interionic Interaction and Dynamics in Ionic Liquids: Effect of Anion Symmetry. *3rd Asia Pacific Symposium on Radiation Chemistry and 10th Trombay Symposium on Radiation & Photochemistry*. 2010 年 9 月 15 日. Lonavala, India.
- ⑭ Hideaki Shirota. Ultrafast Dynamics in Room Temperature Ionic Liquids Studied by Femtosecond Raman-Induced Kerr Effect Spectroscopy. *3rd Asia Pacific Symposium on Radiation Chemistry and 10th Trombay Symposium on Radiation & Photochemistry*. 2010 年 9 月 15 日. Lonavala, India. 招待講演.
- ⑮ Hideaki Shirota. Femtosecond Raman-Induced Kerr Effect Spectroscopic

- Study of Aprotic Molecular Liquids. Ohokayama Workshop on Fundamental Photochemical Processes in Condensed Media. 2010年6月25日. 東京. 招待講演.
- ⑩ H. Shirota. Femtosecond Raman-Induced Kerr Effect Spectroscopic Study on Ionic Liquids. *239<sup>th</sup> American Chemical Society National Meeting*. 2010年3月22日. San Francisco, USA. 招待講演.
- ⑪ 城田秀明、藤澤知績、深澤宏紀、西川恵子、ウィシャート F. ジェームズ. 非芳香性イオン液体の重原子置換効果：イオン間振動ダイナミクスと物性. *第32回溶液化学シンポジウム*. 2009年11月18日. 新潟.
- ⑫ 藤澤知績、西川恵子、城田秀明. フェムト秒光 Kerr 効果分光法によるイオン液体中のイオン間相互作用の検討：高濃度電解質溶液との比較. *第32回溶液化学シンポジウム*. 2009年11月18日. 新潟.
- ⑬ 城田秀明. 非プロトン性分子液体の分子間振動ダイナミクス. *第32回溶液化学シンポジウム・プレシンポジウム*. 2009年11月17日. 新潟. 招待講演.
- ⑭ 城田秀明、藤澤知績、深澤宏紀、西川恵子. 非プロトン性溶媒のフェムト秒ダイナミクス. *第3回分子科学討論会*. 2009年9月22日. 名古屋.
- ⑮ 藤澤知績、西川恵子、城田秀明. フェムト秒ラマン誘起カー効果分光法によるイオン液体中でのイオン間相互作用の検討：高濃度電解質溶液との比較. *第3回分子科学討論会*. 2009年9月22日. 名古屋.
- ⑯ H. Shirota, T. Fujisawa, H. Fukazawa, K. Nishikawa, J.F. Wishart. Interionic Vibrational Dynamics and Interaction in Room Temperature Ionic Liquids: Heavy Atom Substitution Effects. *6<sup>th</sup> International Discussion Meeting on Relaxations in Complex Systems*. 2009年9月1日. Rome, Italy. 招待講演・学会組織委員.
- ⑰ T. Fujisawa, K. Nishikawa, H. Shirota. Femtosecond Optical Kerr Effect Spectroscopy of Ionic Liquids: Comparison with Concentrated Electrolyte Solutions. *6<sup>th</sup> International Discussion Meeting on Relaxations in Complex Systems*. 2009年8月31日-9月1日. Rome, Italy.
- ⑱ H. Shirota, T. Fujisawa, H. Fukazawa, K. Nishikawa. Intermolecular Vibrational Dynamics in Aprotic Molecular Liquids. *International Symposium on "Reaction Dynamics of Many-Body Chemical Systems"*. 2009年6月23日. Kyoto, Japan.
- ⑲ H. Shirota, T. Fujisawa, H. Fukazawa, K.

Nishikawa, J.F. Wishart. Heavy Atom Substitution Effects in Non-Aromatic Ionic Liquids. *3<sup>rd</sup> Congress on Ionic Liquids*. 2009年6月2日. Cairns, Australia.

- ⑳ T. Fujisawa, K. Nishikawa, H. Shirota. Comparison between ionic liquids and concentrated electrolyte solutions by femtosecond optical Kerr effect spectroscopy. *3<sup>rd</sup> Congress on Ionic Liquids*. 2009年6月1日. Cairns, Australia.

[図書] (計1件)

- ① H. Shirota, H. Fukazawa. Atom Substitution Effects in Ionic Liquids: A Microscopic View by Femtosecond Raman-Induced Kerr Effect Spectroscopy. In *Ionic Liquids: Theory, Properties, New Approaches*, Alexander Kokorin, Ed. (InTech: Rijeka, Croatia) **2011**, 201-224 (Chapter 9).

[その他]

ホームページ等

<http://pchem2.s.chiba-u.ac.jp/chem/lab/shirotalab/home-eng.html>

Hirsch Index

本研究プロジェクト期間(4年間)に18(2009年)から26(2013年)に増加。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

城田 秀明 (SHIROTA HIDEAKI)

千葉大学・大学院融合科学研究科・准教授  
研究者番号：00292780

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし