

平成 30 年 5 月 10 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05377

研究課題名(和文) イオン液体の分子間振動におけるアノマリーの解明

研究課題名(英文) Understanding of the anomaly of intermolecular vibration in ionic liquids

研究代表者

城田 秀明 (Shirota, Hideaki)

千葉大学・大学院理学研究院・准教授

研究者番号：00292780

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：2007年の米国のグループにより、ある種のアニオンを有するイオン液体では分子間振動スペクトルが温度に依存しないという、液体には決して見られない驚くべき現象が報告された。本研究課題では、その検証とその原因を分子レベルで理解するために、フェムト秒ラマン誘起カー効果分光装置で種々のイオン液体の分子間振動の温度依存性を検討した。20種以上のイオン液体を調べた結果、米国のグループの結果を再現できず、どのようなイオン液体を用いても分子間振動は温度に依存することが明らかになった。また、芳香族カチオン系イオン液体と非芳香族性イオン液体では、温度の変調により分子間振動バンドの変化の仕方が異なることを見出した。

研究成果の概要(英文)：In 2007, a surprising report was made from the US: some specific ionic liquids show no temperature dependence of the intermolecular vibrational bands. This feature is never observed in common molecular liquids. To understand and clarify this behavior, we have studied the temperature dependence of the intermolecular vibrational dynamics in ionic liquids by femtosecond Raman-induced Kerr effect spectroscopy. We carefully chose ionic liquids whose ion species are systematically different in structure and symmetry. We tested more than 20 samples and found that all ionic liquids show temperature dependent intermolecular vibrational dynamics features, unlike the report by the US group. We also found that the temperature dependent spectral features of aromatic cation base ionic liquids are very different from those of nonaromatic cation based ionic liquids.

研究分野：物理化学

キーワード：イオン液体 フェムト秒ラマン誘起カー効果分光 低振動数スペクトル 分子間振動 温度依存性

1. 研究開始当初の背景

2007年に米国テキサス工科大学 Quitevis のグループは、フェムト秒ラマン誘起カー効果分光により3種類のイミダゾリウム型イオン液体の分子間振動ダイナミクスの温度依存性を調べ、イオン液体の異常性を報告した。すなわち、ビス(トリフルオロスルホニル)アミドをアニオンとするイオン液体の分子間振動スペクトルは温度の上昇に伴い低振動数側にシフトするが、臭素アニオンやヘキサフルオロホスフェートをアニオンとするイオン液体の場合には振動バンドは変化しない、という異常性である。従来の分子液体の分子間振動は、温度の上昇に伴い低振動側にシフトする。これは温度の上昇に伴い、液体の密度が低くなる(自由体積が大きくなる)こと、また、分子間相互作用が弱くなるためである。Quitevisらはこの結果について、臭素アニオンやヘキサフルオロホスフェートをアニオンとするイオン液体の場合にはイオン部が固体状に、ビス(トリフルオロスルホニル)アミドをアニオンとするイオン液体では液体状になっているからではないかと推察しているが、通常の分子液体とは異なり、イオン液体においてなぜそのような特異な温度依存性を示すのか、どのような化学・物理因子がこの特異性を示す要因となるのか、などの根本的な疑問に解を与えるには至っていなかった。

報告者は2003年からイオン液体の分子間振動に関する基礎科学研究を展開してきた。凝縮相の分子間振動バンドは微視的な分子間相互作用や構造を鋭敏に反映するため、その理解はイオン液体のバルク物性を制御するためにも非常に重要である。この課題を開始するまでに報告者らがイオン液体に特徴的な性質を明らかにしてきたものとして、(1)重原子置換効果、(2)非芳香族性イオン液体と芳香族性イオン液体の相違、(3)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相違、などがある。また、この提案の直前に、ビス(トリフルオロメチルスルホニル)アミドをアニオンとするイオン液体の分子間振動の温度依存性の実験を行い、その結果の解釈は Quitevis らのものとは異なり、低振動数側の運動が温度上昇に伴い活発になると説明した。これらの研究結果と成果を踏まえ、様々なアニオンに注目して分子間振動に関する実験を行い、イオン液体のアノマリーについて普遍的な解釈が可能な描像とモデルの構築を試みる本研究課題の提案に至っている。

2. 研究の目的

上記の背景を踏まえ、この研究では、フェムト秒ラマン誘起カー効果分光で検討を行うイオン液体の分子間振動の温度依存性について、

(i)イオン液体を構成するアニオンが与える

影響について構造に基づいた系統的な解釈、(ii)芳香族性と非芳香族性イオン液体の類似点と相違点の理解、

(iii)分子性液体との比較によるイオン液体の特殊性の解明、

に取り組むこととした。これらの具体的事象を明らかにすることにより、イオン液体の分子間振動ダイナミクスにおけるアノマリーを示す化学・物理因子を明確にする。これらの新しい知見を従来の液体科学に加え、その学術領域の枠組みを大きくすることに寄与することを目的としている。

3. 研究の方法

イオン液体を含む液体の分子間振動は約 $1 - 300 \text{ cm}^{-1}$ という低振動数領域に現れる。市販されている一般的な定常状態のラマン分光装置や FT-IR では、この周波数領域、特に約 20 cm^{-1} 以下の領域、の精度良い観測は大変難しいが、フェムト秒ラマン誘起カー効果分光装置は時間領域で観測を行う非線形分光の一種であるため(パルス NMR 測定のように時間領域で得たデータをフーリエ変換して周波数領域のスペクトルを得る)、低振動数領域の観測に適している。フェムト秒ラマン誘起カー効果分光装置は現在世界で約 10 台前後しか稼働しておらず、それらの中でも当研究室で作製した分光装置は、約 10^4 の検出光強度のダイナミックレンジを有し、約 $0.1 - 700 \text{ cm}^{-1}$ の領域を観測できるという世界最高レベルの装置であるため、非常にクオリティーの高いスペクトルを得ることができる。この装置を用いて実験を行った。イオン液体については、当初、(i)アニオンの対称性、(ii)構造異性体を持つアニオン、(iii)芳香族性と非芳香族性イオン液体の相違点、(iv)分性液体との比較、に重点を置く計画を立てたが、さらに、カチオン種の影響、芳香環の荷電効果についても取り組んだ。また、副次的な成果として、芳香族カチオン型イオン液体の分子間振動バンドと液体物性に関するデータ集を構築することにも取り組んだ。液体物性として、密度、粘度、電導度、表面張力の測定も行った。

4. 研究成果

本研究課題に特に強く関連し特に顕著な成果について以下に説明する。

・アニオン種の異なるイミダゾリウムイオン液体の分子間振動バンドの温度依存性 (*J. Phys. Chem. B* **2017**, *121*, 250)

研究の背景で述べたように、Quitevis のグループは 1-メチル-3-ペンチルイミダゾリウムカチオン型イオン液体において臭化物イオンとヘキサフルオロホスフェートを対にしたものについては、温度依存性の全くないスペクトルを示す一方で、ビス(トリフルオロメチルスルホニル)アミドを対としたもの

については温度依存性を示すことを報告した。そこで、本研究では、アニオンの対称性と構造に注目し、(i) 永久双極子モーメントを持たない対称性の高いアニオン、(ii) 永久双極子モーメントを持つ対称性の低いアニオン、(iii) 構造異性体を持つアニオンの三つのグループのアニオン系 10 種類について検討した。

実験の結果、10 種類すべてのイオン液体について、分子間振動バンドは温度に依存することが分かった。また、カチオンのアルキル基の違いが与える影響を見るために、ヘキサフルオロホスフェート塩のカチオンが、1-ブチル-3-メチルイミダゾリウム、1-ヘキシル-3-メチルイミダゾリウムと 1-ヘプチル-3-メチルイミダゾリウムの比較を行った。いずれについても、やはり温度依存の分子間振動バンドが確認された。Quitevis のグループの結果との違いについては (i) 当研究室の fs-RIKES の分光装置の方が、感度良い測定ができていること、(ii) Quitevis のグループでは異なる温度のスペクトルを比較する時に、時間領域のデータとそれをフーリエ変換して得たスペクトルについて規格化しており、これが二重に規格化することになるため、温度によるスペクトル変化が見えにくくなったものと現在のところ考えている。これについては、2017 年の学会で Quitevis と直接議論を行い、同意を得ている。

スペクトルの温度依存性を定量的に議論するために、スペクトルの一次モーメントを求め温度に対してその傾向を見てみると、2 種類の小さな非対称型アニオンのイオン液体を除き、他のイオン液体はほぼ同じ温度依存性を示すことが明らかになった。このことから、温度依存性は主にイミダゾリウムカチオンの影響が表れているものと結論した。この研究では更に、1-イミダゾール(カチオンの中性分子モデル)、四塩化炭素(球対称アニオンの中性分子モデル)、プロピオンニトリル(非対称アニオンの中性分子モデル)についても実験を行い、1-イミダゾールについてはイミダゾリウム型イオン液体と同様の温度依存性を示した。しかしながら、イオン液体と分子液体の分子間スペクトルの温度依存性については、両者で大きな違いは見られなかった。

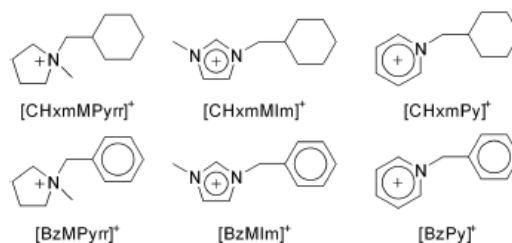
・カチオン種の異なるビス(トリフルオロメチルスルホニル)アミド塩の分子間振動バンドの温度依存性 (*J. Phys. Chem. B*, in press)

上記の研究でイミダゾリウム系イオン液体のアニオン種の影響について検討したので、次にカチオン種に注目した。ビス(トリフルオロメチルスルホニル)アミドをアニオンとして固定し、2 種類の芳香族カチオン(1-ブチル-3-メチルイミダゾリウム、1-ブチルピロリジニウム)と 4 種類の非芳香族カチオン(トリエチルオクチルアンモニウム、ジエチルメチルブチルアンモニウム、1-ブチル-1-メチル

ピロリジニウム、トリエチルオクチルホスホニウム)について検討した。その結果、芳香族系カチオン型イオン液体と非芳香族カチオン系イオン液体では、温度の変調に対して、変化するスペクトルの領域が、低振動数領域($< 20 \text{ cm}^{-1}$)では両系のイオン液体で同じ変化(温度上昇により強度の上昇と若干の低振動数シフト)を示すが、高振動数領域($> 50 \text{ cm}^{-1}$)では芳香族系イオン液体のみがスペクトル変化し、温度上昇に従い低振動数側にシフトすることが明らかになった。一方で、非芳香族系イオン液体については、アルキル鎖の違いについては、スペクトルの温度依存性に影響を与えないことが分かった。

・低振動数スペクトルの温度依存性におけるイオン液体のカチオンの芳香環の電荷の影響 (*J. Chem. Phys.* **2018**, *148*, 193805)

この研究は、米国ブルックヘブン国立研究所の Wishart 博士のグループとの共同研究であり、貴重なサンプルを提供していただいた。目的としては、以下の 6 種類のカチオンを比較することで、スペクトルの温度依存性について芳香環の電荷が与える影響を検討した。



アニオンはいずれのイオン液体についてもビス(トリフルオロメチルスルホニル)アミドである。温度の変化に対する分子間振動由来のスペクトルの変化は、電荷の有無に限らず芳香環を有するカチオンのイオン液体については、ほぼ同様のスペクトル変化が観測された。一方で非芳香環から成るカチオンのイオン液体は温度依存性が異なり、前述の研究 (*J. Phys. Chem. B*, in press) と同様の結果が得られた。

・40 種類の芳香族カチオン型イオン液体の低振動数スペクトルおよび液体物性のデータ集 (*Bull. Chem. Soc. Jpn.* **2016**, *89*, 1106)

本研究は、副次的な成果となるが、当研究室の fs-RIKES では非常に質の高い低振動数領域のスペクトルが得られるので、イオン液体のスペクトルを包括的に理解すること、また、科学の財産として重要であることを念頭に置いて、40 種類の芳香族系イオン液体の測定を行った。この研究は、データ集としての価値があるだけでなく、イオン種によるスペクトルの形状依存性を非常に系統的に明らかにすることができた。また、イオン液体のバルク物性によるパラメータと低振動数スペクトルの関係性を見出し、分子液体に比べてバルク因子に対してスペクトルの一次モ

ーメントは鈍感であることが明らかとなった。現在、非芳香族系イオン液体についても実験を行っている。

・その他、発展・派生した研究

上記の研究に加え、イオン液体と分子液体・高分子液体の混合溶液に関する研究を精力的に開始した。その中でイオン液体とベンゼンの混合系については佐賀大学高橋教授との共同研究に発展した。現在も、その他の混合系についての共同研究を行っており、今後更に発展させる予定である。更に、水素結合会合体を形成し DNA のモデル化合物として研究の対象となっている 7-アザインドールがイオン液体中での会合のしやすさについて、以前報告した分子液体との比較により、イオン液体の特徴を検討している。現在ホスホニウム系イオン液体のアニオン依存性について検討しており、今後芳香族系イオン液体等に発展させる予定である。

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 7件)

S. Kakinuma, H. Shirota. Femtosecond Raman-Induced Kerr Effect Study of Temperature-Dependent Intermolecular Dynamics in Molten Bis(Trifluoromethylsulfonyl)amide Salts: Effects of Cation Species. *J. Phys. Chem. B*, in press. 査読有。

S. Kakinuma, S. Ramati, J. F. Wishart, H. Shirota. Effects of Aromaticity in Cations and Their Functional Groups on the Temperature Dependence of Low-Frequency Spectrum. *J. Chem. Phys.* **2018**, *148* (19), 193805/1–10 (Special Issue on Chemical Physics of Ionic Liquids, 招待執筆). 査読有。

H. Shirota, S. Kakinuma. Temperature Dependent Spectral Features of Room Temperature Ionic Liquids: Aromatic vs. Nonaromatic. *Journal of Physical Chemistry & Biophysics (Proceedings of 4th International Conference on Physical and Theoretical Chemistry)* (Conference Series) **2017**, *7* (4 (Suppl)), 59. 査読有。

S. Kakinuma, T. Ishida, H. Shirota. Femtosecond Raman-Induced Kerr Effect Study of Temperature-Dependent Intermolecular Dynamics in Imidazolium-Based Ionic Liquids: Effects of Anion Species and Cation Alkyl Groups. *J. Phys. Chem. B* **2017**, *121* (1), 250–264. 査読有。

B. Wu, H. Shirota, S. Lall-Ramnarine, E. W. Castner, Jr. Structure of Ionic Liquids with Cationic Silicon-Substitutions. *J. Chem. Phys.* **2016**, *145* (11), 114501/1–14. 査読有。

H. Shirota, S. Kakinuma, K. Takahashi, A. Tago, H. Jeong, T. Fujisawa. Ultrafast Dynamics in Aromatic Cation Based Ionic Liquids: A Femtosecond Raman-Induced Kerr Effect Spectroscopic Study. *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **2016**, *89* (9), 1106–1128. 査読有。

H. Shirota, S. Kakinuma, Y. Itoyama, T. Umecky, T. Takamuku. Effects of Tetrafluoroborate and Bis(trifluoromethylsulfonyl)amide Anions on the Microscopic Structures of 1-Methyl-3-octylimidazolium-based Ionic Liquids and Benzene Mixtures: A Multiple Approach by ATR-IR, NMR and Femtosecond Raman-Induced Kerr Effect Spectroscopy. *J. Phys. Chem. B* **2016**, *120* (3), 513–526. 査読有。

[学会発表](計 39件)

○H. Shirota. Femtosecond Raman-Induced Kerr Effect Spectroscopic Study on Ionic Liquids. *5th International Congress on Microscopy & Spectroscopy*. 2018年4月24-30日. Oludeniz, Turkey. 招待講演。

○H. Shirota. An fs-RIKES Study of Orientational Dynamics in Nondipolar Solutions. *14th Trombay Symposium on Radiation & Photochemistry*. 2018年1月3-7日. Mumbai, India. 招待講演。

○城田秀明. フェムト秒ラマン誘起カー効果分光によるリドカイン水溶液の分子間ダイナミクスの濃度依存性. *日本化学会第98春季年会*. 2018年3月20-23日. 船橋。

○柿沼翔平, S. Ramati, J. F. Wishart, 城田秀明. イオン液体の低振動数スペクトルの温度依存性: カチオンとその側基の芳香族性の影響. *日本化学会第98春季年会*. 2018年3月20-23日. 船橋。

○高橋浩太郎, 城田秀明. 7-アザインドールの二量化におけるホスホニウム系イオン液体のアニオン効果. *日本化学会第98春季年会*. 2018年3月20-23日. 船橋。

○安藤雅俊, 城田秀明. イオン液体/ポリエチレングリコール混合溶液の液体物性と低振動数スペクトル. *日本化学会第98春季年会*. 2018年3月20-23日. 船橋。

K. Takahashi, ○H. Shirota. Dimerization of 7-Azaindole in Phosphonium-based Ionic Liquids with a Variety of Anions. *13th IUPAC International Conference on Novel Materials and their Synthesis*. 2017年10月15-20日. Nanjing, China. 招待講演。

○H. Shirota, S. Kakinuma. Temperature Dependent Spectral Features of Room Temperature Ionic Liquids: Aromatic vs. Nonaromatic. *4th International Conference on Physical and Theoretical Chemistry*. 2017年9

月 18-19 日. Dublin, Ireland. 招待講演.
S. Kakinuma, ○H. Shirota. Temperature Dependence of Intermolecular Vibrational Dynamics in Room Temperature Ionic Liquids. *8th International Discussion Meeting on Relaxations in Complex Systems*. 2017 年 7 月 23-28 日. Wisla, Poland. 招待講演.
○H. Shirota. Low-Frequency Spectra of Condensed Phases by Femtosecond Raman-Induced Kerr Effect Spectroscopy: Room Temperature Ionic Liquids. *Analytix-2017*. 2017 年 3 月 22-24 日. 福岡. 招待講演.
○H. Shirota. Ultrafast Dynamics of Polystyrene in Carbon Tetrachloride Studied by Femtosecond Raman-Induced Kerr Effect Spectroscopy. *European Molecular Liquid Group / Japanese Molecular Liquid Group Annual Meeting 2017*. 2017 年 9 月 10-14 日. Vienna, Austria.
○S. Kakinuma, H. Shirota. Temperature Dependence of Low-Frequency Spectra in Ionic Liquids: Comparison of Imidazolium, Pyridinium, Pyrrolidinium, Ammonium, and Phosphonium Cations. *European Molecular Liquid Group / Japanese Molecular Liquid Group Annual Meeting 2017*. 2017 年 9 月 10-14 日. Vienna, Austria.
○K. Takahashi, H. Shirota. Determination of Dimerization Constants of 7-Azaindole in Phosphonium-Based Ionic Liquids by ¹H NMR. *European Molecular Liquid Group / Japanese Molecular Liquid Group Annual Meeting 2017*. 2017 年 9 月 10-14 日. Vienna, Austria.
S. Kakinuma, ○H. Shirota. Temperature Dependence of Low-Frequency Spectra of Ionic Liquids: A Femtosecond Raman-Induced Kerr Effect Spectroscopic Study. *XVIII Time Resolved Vibrational Spectroscopy*. 2017 年 7 月 16-21 日. Cambridge, UK.
○城田秀明. 液体・溶液の超高速ダイナミクス. *2017 年度合成有機化学講演会*. 2017 年 11 月 4 日. 岡山. 招待講演.
○城田秀明. 永久双極子のない分子溶液系の過減緩和過程. *第 40 回溶液化学シンポジウム*. 2017 年 10 月 18-20 日. 姫路.
高橋浩太郎, ○城田秀明. 様々なアニオン種を有するホスホニウム系イオン液体中での 7-アザインドールの状態. *第 40 回溶液化学シンポジウム*. 2017 年 10 月 18-20 日. 姫路.
○城田秀明. フェムト秒ラマン誘起カー効果分光によるポリスチレン溶液の低振動スペクトル. *平成 29 年度日本分光学会年次大会*. 2017 年 5 月 23-25 日. 東京.
○柿沼翔平, 城田秀明. フェムト秒ラマン誘起カー効果分光でみるイオン液体の低振動数スペクトルの温度依存性: カチオン構造の影響. *平成 29 年度日本分光学会年次大会*. 2017 年 5 月 23-25 日. 東京.
○城田秀明. フェムト秒ラマン誘起カー効果分光でみるリドカイン水溶液の分子間ダ

イナミクス: 濃度依存性. *日本化学会第 97 春季年会*. 2017 年 3 月 16-19 日. 横浜.
② ○柿沼翔平, 城田秀明. イオン液体のカチオン構造が与える低振動数スペクトルの温度依存性への影響. *日本化学会第 97 春季年会*. 2017 年 3 月 16-19 日. 横浜.
② ○高橋浩太郎, 城田秀明. ホスホニウム系イオン液体中での 7-アザインドールの二量化定数. *日本化学会第 97 春季年会*. 2017 年 3 月 16-19 日. 横浜.
③ S. Kakinuma, ○H. Shirota. Temperature Dependence of Intermolecular Dynamics of Imidazolium Based Ionic Liquids. *EMN Meeting on Ultrafast 2016*. 2016 年 10 月 14-16 日. Melbourne, Australia. 招待講演.
④ S. Kakinuma, ○H. Shirota. Temperature Dependent Features of Low-Frequency Spectra of Imidazolium-Based Ionic Liquids: Anion Dependence. *International Meeting on Recent Advances in Molecular Spectroscopy 2016*. 2016 年 3 月 2-4 日. Hyderabad, India. 招待講演.
⑤ S. Kakinuma, ○H. Shirota. Temperature Dependent Features of Low-Frequency Spectra for Imidazolium-Based Ionic Liquids: Comparison with Analogous Molecular Liquids. *European Molecular Liquid Group / Japanese Molecular Liquid Group Annual Meeting 2016*. 2016 年 9 月 11-16 日. Chania, Greece.
⑥ ○柿沼翔平. フェムト秒ラマン誘起カー効果分光による芳香族イオン液体の低振動数スペクトルの温度依存性に関する研究. *第 12 回若手研究者による先端的レーザー分光シンポジウム*. 2016 年 12 月 3 日. 東京. 招待講演.
⑦ ○城田秀明. 液体・溶液の分子間ダイナミクス: 低振動数領域の分光手法とスペクトルの解釈. *第 56 回分子科学若手の会夏の学校*. 2016 年 8 月 22-26 日. 京都. 招待講師・講演.
⑧ ○城田秀明. フェムト秒ラマン誘起カー効果による室温イオン液体の分子間振動ダイナミクス. *講演会「イオン液体の分子科学～基礎からひもとく物性, 機能～」*. 2016 年 6 月 24 日. 東京. 招待講演.
⑨ ○柿沼翔平, 城田秀明. イミダゾリウム系イオン液体の分子間ダイナミクスの温度依存性. *第 6 回 CSJ 化学フェスタ 2016*. 2016 年 11 月 14-16 日. 東京.
⑩ 柿沼翔平, ○城田秀明. フェムト秒ラマン誘起カー効果分光でみるイミダゾリウム型イオン液体の分子間振動の温度依存性. *第 39 回溶液化学シンポジウム*. 2016 年 11 月 9-11 日. つくば.
⑪ ○高橋浩太郎, 城田秀明. ホスホニウム系イオン液体中での 7-アザインドールの状態: 二量化へのアニオンの影響. *第 39 回溶液化学シンポジウム*. 2016 年 11 月 9-11 日. つくば.
⑫ ○城田秀明. 芳香族カチオン型イオン液

体の低振動数スペクトルの特徴. *日本化学会第96春季年会*. 2016年3月24-27日. 京田辺.

③③ ○柿沼翔平, 城田秀明. イミダゾリウム系イオン液体の低振動数スペクトルの温度依存性. *日本化学会第96春季年会*. 2016年3月24-27日. 京田辺.

③④ ○高橋浩太郎, 城田秀明. イオン液体のカチオン構造および分子液体の分子構造が与える低振動スペクトルへの影響. *日本化学会第96春季年会*. 2016年3月24-27日. 京田辺.

③⑤ ○多胡彰人, 城田秀明. リチウム塩 - アミド系共晶融液の物性: アミド分子における置換基効果. *日本化学会第96春季年会*. 2016年3月24-27日. 京田辺.

③⑥ ○H. Shirota. Physical Properties and Ultrafast Dynamics of Dicationic Ionic Liquids: Comparison with Monocationic Ionic Liquids. *EMN Meeting on Ultrafast Research 2015*. 2015年11月16-19日. Las Vegas, USA. 招待講演.

③⑦ ○H. Shirota. Ionic Liquids Based on Dications: Physical Properties and Ultrafast Dynamics. *11th IUPAC International Conference on Novel Materials and their Synthesis*. 2015年10月11-26日. Qinhuangdao, China. 招待講演.

③⑧ S. Kakinuma, ○H. Shirota. Temperature Dependence of Low-Frequency Spectra in Ionic Liquids having Spherical Top Anions. *European Molecular Liquid Group / Japanese Molecular Liquid Group Annual Meeting 2015*. 2015年9月6-10日. Rostock, Germany.

③⑨ ○S. Kakinuma, H. Shirota. Intermolecular Dynamics of Six-Membered Ring Molecular Liquids: Effects of Conjugation and Polarizability Anisotropy. *European Molecular Liquid Group / Japanese Molecular Liquid Group Annual Meeting 2015*. 2015年9月6-10日. Rostock, Germany.

〔その他〕

ホームページ等

<http://shirota-lab.adv.chiba-u.jp/>

Hirsch Index

本研究プロジェクト期間(3年間)に31(2015年)から38(2018年)に増加。

6. 研究組織

(1)研究代表者

城田秀明 (SHIROTA, HIDEAKI)

千葉大学大学院理学研究院・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

(4)研究協力者

柿沼翔平 (KAKINUMA, SHOHEI)

千葉大学大学院融合科学研究科・博士課程

大学院生