

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24245007

研究課題名(和文) ケイ素-ケイ素三重結合化合物を基盤とした高周期元素非平面 電子化合物の創製

研究課題名(英文) Chemistry of Non-Planar π -Electronic Compounds of Heavier Elements Based on the Silicon-Silicon Triple Bond

研究代表者

関口 章 (SEKIGUCHI, AKIRA)

筑波大学・数理物質系・教授

研究者番号：90143164

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,600,000円

研究成果の概要(和文)：多重結合ケイ素化合物は対応する炭素化合物には見られない特異な性質や反応性を示す。安定な三重結合ケイ素化合物「ジシリル」の高い反応性によって不飽和典型元素化学に魅力ある反応例が加わり、炭素を中心とした有機化学と高周期元素化学の違いに多くの知見を与えた。本研究では、ジシリルとカルバニオン金属反応剤、強い供与性配位子として知られる環状ジアミノカルベン(NHC)との反応性について検討した。いずれの場合も、一方の三重結合ケイ素原子に求核種(カルバニオン、NHC)が付加したジシレンド型化合物を与えることを見出した。ケトンとの反応によって、特異な分子構造を持つ酸素置換の二重結合ケイ素化合物も創出した。

研究成果の概要(英文)：Unsaturated main group 14 element species, such as disilene and disilyne, have unique properties and reactivity compared with their organic analogues. The isolation of stable disilynes, one of the most recent and intriguing additions to the catalogue of unsaturated main group species, has opened the way for further studies of the differences between organic compounds and their heavy analogues. Here, we investigated the reactivity toward organometallic reagents, such as organolithium compound and N-heterocyclic carbene (NHC) with a high σ -character, leading to the new doubly-bonded silicon compounds bearing disilenide functions. Unusual O-substituted disilene derivatives were also prepared by the reaction of a disilyne with carbonyl compounds.

研究分野：有機元素化学

キーワード：ケイ素-ケイ素三重結合化合物 高周期元素化学 多重結合 電子化合物 X線結晶構造解析

1. 研究開始当初の背景

炭素を中心とし、窒素、酸素などを加えた第2周期元素を主たる構成元素とする有機化合物の構造と反応性は、いわゆる有機化学として確立されてきた。一方で、典型元素では最外殻電子がその原子の特性を大まかに特徴づけるという観点から一般的な有機化合物の構成元素を同族の第3周期以降の高周期元素に置き換えた化合物の化学が展開されてきた。著者らが主たる対象元素として研究を進めてきた炭素と同族の高周期元素(ケイ素、ゲルマニウム、スズ、鉛)の比較元素論的研究においては、後述する研究代表者らの研究成果を含め大きく発展してきた。即ち、第2周期元素で存在するほぼすべての化合物に対して類似の結合様式を持つ高周期元素類縁体は存在しえるが、その構造や反応性には類似性と共に著しい差異が認められている。また、第2周期元素では5配位、6配位等の高配位化合物を形成することは困難であるが、高周期典型元素ではオクテット則を越える高配位化合物(超原子価化合物)を比較的安定に形成することも知られており、高周期典型元素特有の化学も展開されている。

2. 研究の目的

以上のような高周期典型元素の化学における研究背景の下、研究代表者らは炭素-炭素三重結合化合物「アセチレン」の sp 炭素をケイ素に置き換えたケイ素-ケイ素三重結合化合物「ジシリン」を安定な化合物として合成、単離することに2004年に世界で初めて成功し、その分子構造を決定した。炭素-炭素三重結合は直線構造を持つのは対照的にケイ素-ケイ素三重結合はトランス折れ曲がり構造を持つであろうことは理論計算では予測されていたが、実験的に合成し、分子構造を決定した初めての例であり、その後、いくつかの新規な安定ジシリンの合成、構造解析、物性解析なども行い、置換基の立体的、電子的差異によるトランス折れ曲がり角の変化、それに起因する物性の変化などを明らかにしてきた。本研究では、研究代表者らのこれまでのジシリンおよび関連する多重結合性ケイ素化合物の研究成果に立脚し、ジシリンを含めた三重結合性ケイ素化合物の化学のさらなる展開と理解を深めることを目的とした。

3. 研究の方法

これまでのジシリンと有機小分子の反応性に関する研究により、ジシリンとの反応では、軌道準位が低いジシリンの最低非占有軌道(LUMO)へのアルケン、アルキンの π 電子による求核的反応が鍵となって付加反応

が進行し、続く環拡大反応(およびさらなる2次反応)を経て環状ジシレンやジシラベンゼンを与えることを見出している。本研究では、より一般的な求核種である有機金属反応剤や、強い σ 供与性配位子として注目されている環状ジアミノカルベン(NHC)との反応性について検討した。また、炭素-炭素二重結合化合物アルケンとの反応を参考として、炭素-酸素二重結合化合物であるケトン類との反応についても検討した。

4. 研究成果

(1) ジシリンと有機金属反応剤および環状ジアミノカルベンとの反応性に関する研究

ジシリン1にメチルリチウム、ジメチル亜鉛、メチルマグネシウムブロミドを作用させると、一方の三重結合ケイ素へのメチル基の付加が起こり、対応する金属置換ジシレン2を与えることが分かった(図1)。X線結晶構造解析で決定したジシレニド金属種の分子構造は、亜鉛置換ジシレン2bが単量体であるのに対し、マグネシウム置換ジシレン2cは臭素原子を介した二量体であることが分かった。また、金属置換ジシレンは sp^2 ケイ素求核剤としてさらに求電子剤との反応が可能であり、ヨウ化メチルや臭化エチルなどの炭素求核剤との反応によりジシレンケイ素上に第2のアルキル基を導入可能であることも明らかにした。

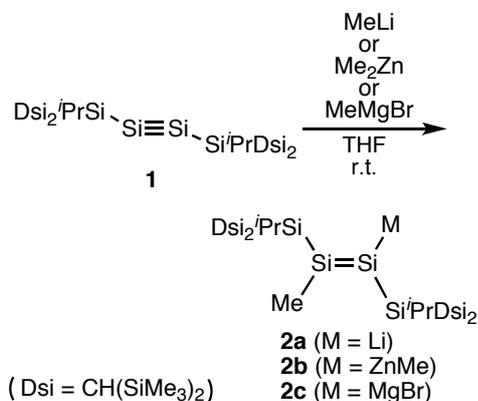


図1. ジシリン1と有機金属種の反応

ジシリン1は、強い σ 供与性配位子(求核剤)である環状ジアミノカルベン(NHC)とも容易に反応し、一方の三重結合ケイ素にNHCが結合した1:1付加体3を与えることが分かった(図2)。各種分光学的データ、X線結晶構造解析で決定した分子構造(図3)、理論計算による解析の結果、この3はイミダゾリウム基を置換基とする双性イオン型ジシレニド種であることが明らかになった。

(2) ジシリンとカルボニル化合物との反応性

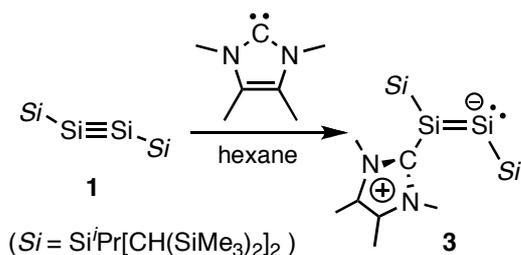


図2. ジシリン1とNHCの反応

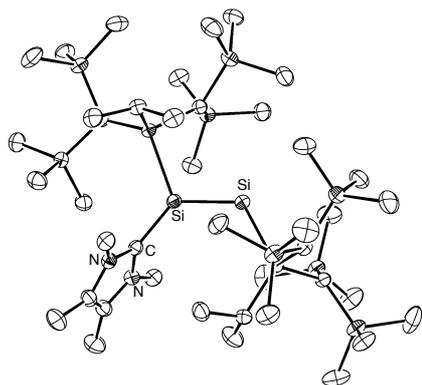


図3. ジシリン-NHC付加体3の分子構造

ジシリン1にアセトンやジエチルケトンなどの立体的に小さいジアルキルケトンを過剰に作用させると、ケイ素-ケイ素三重結合に二分子のケトンが $\text{C}=\text{O}$ 二重結合で二重に [2 + 2]環化付加した二環式化合物 4 を与えた (図4)。本反応では、ジシリンの一方のケイ素原子にカルボニル炭素が二つ結合し、もう一方のケイ素原子に酸素原子二つが結合した 4 が選択的に生成し、それぞれのケイ素原子に炭素と酸素が結合した異性体は生じない。これは、1分子目のケトンの付加で生じる酸素置換4員環ジシレン中間体 5a, b におけるケイ素=ケイ素二重結合の分極に起因して、2分子目のケトンの [2 + 2]環化付加が位置選択的に、即ち 5a, b の酸素が結合したより陽性なケイ素原子に2分子目のケトンの酸素原子が求核的に作用するためである。

カルボニル炭素原子周りがより嵩高くなるジイソプロピルケトンやアダマンタン、イソプロピル (p-トリル) ケトンは過剰に作用させてもジシリンと1:1で [2 + 2]環化付加した酸素置換4員環ジシレン 5c, d, e を与えることが分かった (図5)。

一方、ジシリン1はジアリールケトンとも反応するが、酸素置換4員環ジシレン 6 を経由して、最終的にシレン縮環型5員環シレン 7 を与えることが分かった (図6)。ジアリールケトンのアリール基上の置換基が電子吸引性基であるトリフルオロメチル基の場合、中間に生じる 8a は熱的にやや不安定

であったが単離可能で、その分子構造を単結

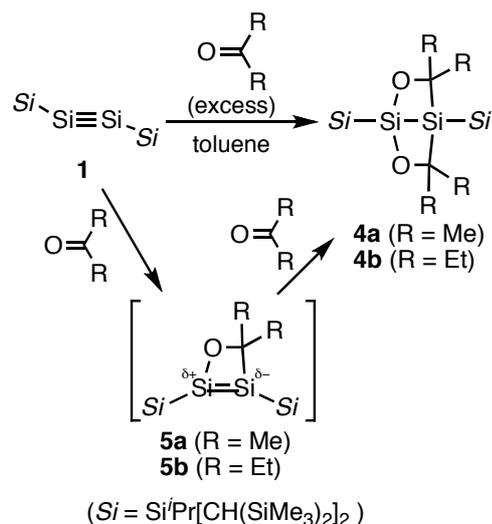


図4. ジシリン1とジアルキルケトンの反応

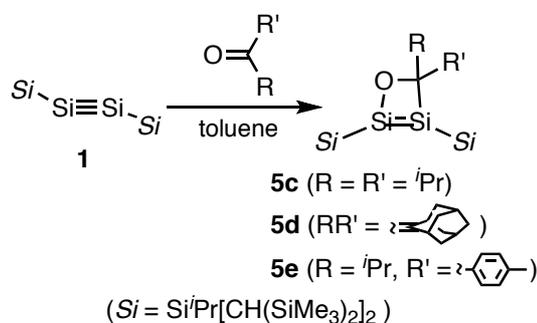


図5. ジシリン1と嵩高いケトンの反応

晶X線構造解析することに成功している。一方、電子供与性基であるメチル基、メトキシ基の場合の酸素置換4員環ジシレン 6b, c はNMR等による直接観測には成功していないが、低温下での反応後のメタノール捕捉生成物の解析からそれらの生成を確認した。

酸素置換4員環ジシレン 6の安定性に及ぼす骨格炭素上のアリール基の電子的効果は明らかであり、電子供与性基により6の熱安定性が低くなり7への異性化速度が速くなることから、6の炭素-酸素結合の不均衡開裂で炭素上アリール基の電子供与基により安定化される $\text{Ar}_2\text{C}^+(\text{R})\text{Si}=\text{Si}(\text{R})\text{O}^-$ 双性イオン型遷移状態を経て8を生じると考えられた。また、ジシリンの置換基を Me_3Si 基で簡略化したモデル化合物を用いた理論計算により見積もった 6' から 8' への異性化の活性化障壁は、6a' で 22.1 kcal/mol であるのに対し、6b, c ではそれぞれ 18.6 kcal/mol、16.3 kcal/mol に低下すること、遷移状態における $\text{C}^{\delta+}\cdots\text{O}^{\delta-}$ の分極がより大きくなることを確認した。続いて8のシレンケイ素の酸素原子上への転位、オキシシレン 9 の分子内アリール基への環化、環拡大を経て最終的に7を

与えたと考えられた。

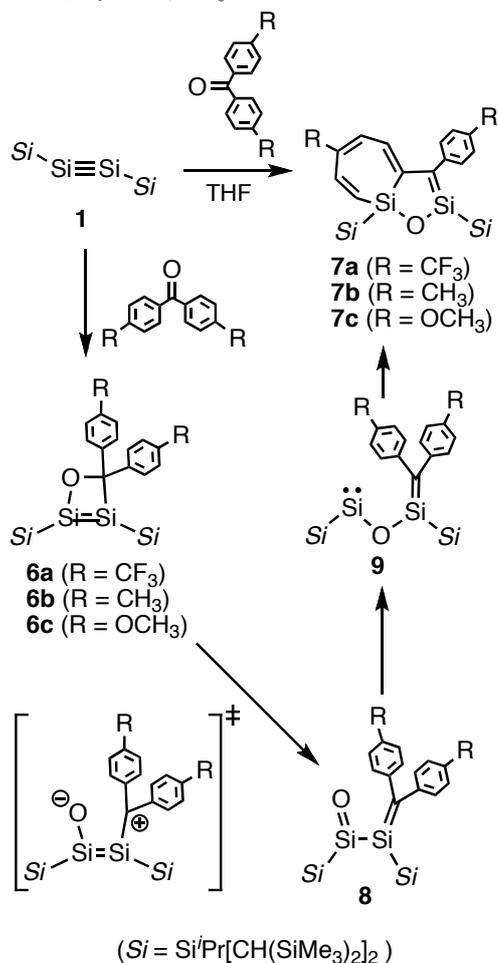


図6. ジシリル1とジアリールケトンの反応

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31件)

- 1) V. Ya. Lee, O.A. Gapurenko, S. Miyazaki, A. Sekiguchi, R. M. Minyaev, V. I. Minkin, H. Gornitzka, From a Si₃-Cyclopropene to a Si₃S-Bicyclo[1.1.0]butane to a Si₃S₂-Bicyclo[1.1.0]-butane: Back-and-Forth, and In Between. *Angew. Chem., Int. Ed.*, **54**, 14118-14122 (2015). doi.10.1002/anie.201506625. (査読有)
- 2) A. Kostenko, B. Tumanskii, M. Karni, S. Inoue, M. Ichinohe, A. Sekiguchi, Y. Apeloig, Observation of a Thermally Accessible Triplet State Resulting from Rotation around a Main Group p-bond. *Angew. Chem., Int. Ed.*, **54**, 1214-12148 (2015). doi.10.1002/anie.201506291. (査読有)
- 3) K. Fukuda, T. Nozawa, H. Yotsuyanagi, M. Ichinohe, A. Sekiguchi, M. Nakano,

Theoretical Study on the Enhancement of the Second Hyperpolarizabilities of Si-, Ge-Disubstituted Quinodimethanes: Synergy Effects of Open-Shell Nature and Intramolecular Charge Transfer. *J. Phys. Chem. C*, **119**, 1188-1193 (2015). doi.10.1021/jp511521m. (査読有)

- 4) N. Nakata, S. Aoki, V. Ya. Lee, A. Sekiguchi, A Schrock-Type Germylene Complex: ($\eta^5\text{-C}_5\text{H}_4\text{Et}$)₂(PMe₃)Hf=Ge(SiMe^tBu₂)₂. *Organometallics*, **34**, 2699-2702 (2015). doi.10.1021/om501134a. (査読有)
- 5) H. Matsui, K. Fukuda, S. Takamuku, A. Sekiguchi, M. Nakano, Theoretical Study on the Relationship between Diradical Character and Second Hyperpolarizabilities of Four-Membered-Ring Diradicals Involving Heavy Main Group Elements. *Chem. Eur. J.*, **21**, 2157-2164 (2015). doi.10.1002/chem.201404592. (査読有)
- 6) V. Ya. Lee, A. Sekiguchi, 1,1-Dilithiosilanes, 1,1-Dilithiogermanes, 1,1-Dilithiostannanes and Related Compounds: Organometallic Reagents of the New Generation. *Mendeleev Communications*, **25**, 161-167 (2015). doi.10.1016/j.mencom.2015.05.001. (査読有)
- 7) K. Fukuda, T. Nozawa, H. Yotsuyanagi, M. Ichinohe, A. Sekiguchi, M. Nakano, Theoretical Study on the Enhancement of the Second Hyperpolarizabilities of Si-, Ge-Disubstituted Quinodimethanes: Synergy Effects of Open-Shell Nature and Intramolecular Charge Transfer. *J. Phys. Chem. C*, **119**, 1188-1193 (2015). doi.10.1021/jp511521m. (査読有)
- 8) V. Ya. Lee, K. McNiece, Y. Ito, A. Sekiguchi, N. Geinik, J. Y. Becker, Tetrakis(di-tert-butylmethylsilyl)digermene: Synthesis, Structure, Electrochemical Properties and Reactivity. *Heteroatom Chem.*, **25**, 313-319 (2014). doi.10.1002/hc. (査読有)
- 9) V. Ya. Lee, S. Aoki, M. Kawai, T. Meguro, A. Sekiguchi, Stibasilene Sb=Si and Its Lighter Homologues: A Comparative Study. *J. Am. Chem. Soc.*, **136**, 6243-6246 (2014). doi.org/10.1021/ja5026084. (査読有)
- 10) K. Taira, M. Ichinohe, A. Sekiguchi, Isolable Aryl-substituted Silyl Radicals: Synthesis, Characterization, and Reactivity. *Chem. Eur. J.*, **20**, 9342-9348 (2014). doi.10.1002/chem.201402482. (査読有)
- 11) M. J. Cowley, Y. Ohmori, V. Huch, M. Ichinohe, A. Sekiguchi, D. Scheschkewitz, Carbonylation of Cyclotrisilenes. *Angew.*

- Chem., Int. Ed.*, **52**, 13247-13250 (2013).
doi:10.1002/anie.201307450. (査読有)
- 12) V. Ya. Lee, R. Kato, A. Sekiguchi, Heavy Metallocenes of the Group 8 Metals: Ferrocene and Ruthenocene Derivatives. *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **86**, 1466-1471 (2013). doi:10.1246/bcsj.20130235. (査読有)
 - 13) V. Ya. Lee, Y. Ito, A. Sekiguchi Tetragermacyclobutadiene Tricarbonylruthenium{ $[\eta^4\text{-(Bu}^t\text{MeSi)}_4\text{Ge}_4]\text{Ru(CO)}_3$ }. *Russian Chem. Bull.*, 2551-2553 (2013). ISSN 0002-3353. (査読有)
 - 14) Y. Ohmori, M. Ichinohe, A. Sekiguchi, M. J. Cowley, V. Huch, D. Schesckewitz, Functionalised Cyclic Disilenes via Ring-Expansion of Cyclotrisilenes with Isonitriles. *Organometallics*, **32**, 1591-1594 (2013). doi.org/10.1021/om400054u. (査読有)
 - 15) Y. Ito, V. Ya. Lee, H. Gornitzka, C. Goedecke, G. Frenking, A. Sekiguchi, Spirobis(pentagerma[1.1.1]propellane): A Stable Tetra-radicaloid. *J. Am. Chem. Soc.*, **135**, 6770-6773 (2013). doi.org/10.1021/ja401650q. (査読有)
 - 16) V. Ya. Lee, S. Aoki, T. Yokoyama, S. Horiguchi, A. Sekiguchi, H. Gornitzka, J.-D. Guo, S. Nagase, Toward a Silicon Version of Metathesis: From Schrock Titanium Silylidenes to Silatitanacyclobutenes. *J. Am. Chem. Soc.*, **135**, 2987-2990 (2013). doi.org/10.1021/ja401072j. (査読有)
 - 17) Y. Ohmori, M. Ichinohe, A. Sekiguchi, M. J. Cowley, V. Huch, D. Schesckewitz, Functionalised Cyclic Disilenes via Ring-Expansion of Cyclotrisilenes with Isonitriles. *Organometallics*, **32**, 1591-1594 (2013). doi.org/10.1021/om400054u. (査読有)
 - 18) M. Asay, A. Sekiguchi, Recent Developments in the Reactivity of Stable Disilynes. *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **85**, 1245-1261 (2012). doi:10.1246/bcsj.20120212. (査読有)
 - 19) H. Tanaka, M. Ichinohe, A. Sekiguchi, An Isolable NHC-stabilized Silylene Radical Cation: Synthesis and Structural Characterization. *J. Am. Chem. Soc.*, **134**, 5540-5543 (2012). (査読有) doi.org/10.1021/ja301180v
 - 20) K. Takeuchi, M. Ichinohe, A. Sekiguchi, A New Disilene with π -Accepting Groups from the Reaction of Disilyne $\text{RSi}\equiv\text{SiR}$ ($\text{R} = \text{Si}^i\text{Pr}[\text{CH}(\text{SiMe}_3)_2]$) with Isocyanides. *J. Am. Chem. Soc.*, **134**, 2954-2957 (2012). doi.org/10.1021/ja212065a. (査読有)
 - 21) T. Yamaguchi, M. Asay, A. Sekiguchi, $[[(\text{Me}_3\text{Si})_2\text{CH}]_2^i\text{PrSi(NHC)Si}=\text{Si}(\text{Me})\text{Si}^i\text{Pr}[\text{C}(\text{H}(\text{SiMe}_3)_2)_2]^+]$: A Molecule with Disilynyl Cation Character. *J. Am. Chem. Soc.*, **134**, 836-839 (2012). doi.org/10.1021/ja210669n. (査読有)
- 他 10 編
- [学会発表] (計 180 件)
- 1) 関口 章, 低配位ケイ素化合物の創製と機能, 第 96 回春季年会, 同志社大学 京田辺キャンパス, 京都府 京田辺市, 2016 年 3 月 25 日
 - 2) M. Ichinohe, A. Mori, A. Sekiguchi, Trilithiosilane: Synthesis and Property. PacificChem 2015, Honolulu, Hawaii, USA, Dec. 15-20, 2015.
 - 3) Y. Ohmori, M. Ichinohe, A. Sekiguchi Reactivity of Cyclotrisilene toward Azides. The 5th Asian Silicon Symposium, Lotte City Hotel, Jeju, Korea, Oct. 19, 2015.
 - 4) A. Sekiguchi, Low-Coordinate Organosilicon Compounds: Chemistry and Materials for Storage of Energy System. International Symposium of the CRC/SFB 813 "Chemistry at Spin Centers 2014", Bad Honnef, Germany, Sep. 24-26, 2014.
 - 5) Y. Apeloig, A. Kostenko, M. Karni, S. Inoue, M. Ichinohe, A. Sekiguchi, B. Tumanski, Thermally Accessible Triplet State of the Highly Twisted Tetrakis(di-tert-butylmethylsilyl)disilene. The 17th International Symposium on Silicon Chemistry (ISOSXVII), Berlin Technical University, Berlin, Germany, Aug. 3-8, 2014.
 - 6) A. Sekiguchi, Low-Coordinate Organosilicon Compounds: From Phantom Species to Isolable Compounds. The 17th International Symposium on Silicon Chemistry (ISOSXVII), Berlin Technical University, Berlin, Germany, Aug. 3-8, 2014.
 - 7) V. Ya. Lee, S. Aoki, T. Yokoyama, A. Sekiguchi, Towards the Silicon/Germanium Versions of Metathesis. The XXVI International Conference on Organometallic Chemistry, Sapporo, Hokkaido, Japan, July 13-18, 2014.
 - 8) A. Sekiguchi, Stable Radicals of the Heavy Group 14 Elements: From Phantom Species to Isolable Compounds and Their Application. 247th ACS National Meeting, Symposium in honor of Guy Bertrand 2014 recipient of the ACS Inorganic Chemistry Award, Dallas, Texas, USA, March 19, 2014.
 - 9) A. Sekiguchi, The Storage of Energy by Stable Heavier Group 14 Element Radicals.

- 2014 CENIDE-CNMM-TIMS Joint Symposium on Interdisciplinary Nano-Science and Technology, National Tsing Hua University, Hsinchu, Taiwan, Jan. 4-7, 2014.
- 10) A. Sekiguchi, Chemistry of Low-Coordinate Organosilicon and Heavier Group 14 Element Compounds. Doctor Honoris Causa Lecture, Toulouse, France, July 11, 2013.
 - 11) A. Sekiguchi, Stable Radicals of the Heavy Group 14 Elements: From Phantom Species to Isolable Compounds and Their Application. 6th Pacific Symposium on Radical Chemistry (6th-PSRC), Vancouver, Canada, June 17, 2013.
 - 12) B. Tumanskii, A. Kostenko, M. Karni, S. Inoue, M. Ichinohe, A. Sekiguchi, Y. Apeloig, Thermally Accessible Triplet State of the Highly Twisted Tetrakis(di-*tert*-butylmethylsilyl)disilene. The 45th Silicon Symposium, Lubbock, Texas, USA, May 22, 2013.
 - 13) T. Kitagawa, M. Endo, M. Nakamoto, A. Sekiguchi, New Heavy Elements Cyclic π -System; Synthesis and Structure of 1,3-disilacyclobutadiene. The 4th Tsukuba-Hsinchu Joint Symposium on Interdisciplinary Nano-Science and Technology, University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki, Japan, Dec. 17-18, 2012.
 - 14) Y. Ohmori, M. Ichinohe, A. Sekiguchi, Synthesis of Unsaturated Si₃C Four-membered Rings via the Reaction of Cyclotrisilene with Isocyanides. The 4th Tsukuba-Hsinchu Joint Symposium on Interdisciplinary Nano-Science and Technology, University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki, Japan, Dec. 17-18, 2012.
 - 15) Y. Ohmori, M. Ichinohe, A. Sekiguchi, Reactivity of Cyclotrisilene toward Alkyl and Aryl Isocyanides. 3rd International Symposium on Creation of Functional Materials, University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki, Japan, Dec. 10-11, 2012.
 - 16) K. Haga, M. Ichinohe, A. Sekiguchi, Synthesis, Structure, and Reactivity of Novel Disilene Metals Derived from Disilyne. 4th Asian Silicon Symposium (ASiS-4), Tsukuba, Ibaraki, Japan, Oct. 21-24, 2012.
 - 17) M. Asay, T. Yamaguchi, A. Sekiguchi, A Heavy Analog of Vinyl Cation: Synthesis of an NHC-Stabilized Disilene Cation. 4th Asian Silicon Symposium (ASiS-4), Tsukuba, Ibaraki, Japan, Oct. 21-24, 2012.
 - 18) A. Sekiguchi, Novel Ring Systems from Disilynes. International Symposium on Inorganic Ring Systems (IRIS 13), Victoria,

Canada, July 29-August 2, 2012.

- 19) V. Ya. Lee, S. Aoki, T. Yokoyama, R. Sakai, A. Sekiguchi, J. D. Guo, S. Nagase, Schrock-type Titanium Silylene and Germylene Complexes. 10th International Conference on Heteroatom Chemistry (ICHAC10), Uji Ohbaku Plaza, Kyoto University, Kyoto, Japan, May 20-25, 2012.

他 161 件

〔図書〕 (計 6 件)

- 1) V. Ya. Lee, A. Sekiguchi, Heavier Group 14 Element Redox Systems. in Organic Redox Systems; T. Nishinaga Eds., Chapter 19. pp. 545-561, John Wiley & Sons., (2016).
- 2) V. Ya. Lee, A. Sekiguchi, Multiple Bonded Compounds of the Heavy Group 14 Elements. Comprehensive Inorganic Chemistry II, From Elements to Applications. Elsevier, pp. 289-324 (2013).
- 3) 松尾 司, 関口 章, 現代ケイ素化学: 体系的な基礎概念と応用に向けて: ジシレンとジシリル, 化学同人, pp. 134-150 (2013).
- 4) 松尾 司, 関口 章, 未来材料を創出する π 電子系の科学: 第 8 章 典型元素不飽和結合の π 電子化学: ケイ素不飽和結合の最新化学, 日本化学会編 化学同人 pp. 98-104 (2013).
- 5) 関口 章, 高次 π 空間の創発と機能開発, 第 1 章 新しい π 電子化合物の創製: 「三重結合ケイ素化合物による特異な π 空間と反応場の形成」 シーエムシー出版, pp. 44-47 (2013).

他 1 件

〔その他〕

ホームページ等

<http://nao.chem.tsukuba.ac.jp/sekiguch/index.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

関口 章 (SEKIGUCHI AKIRA)
筑波大学・数理物質系・教授
研究者番号: 90143164

(2) 連携研究者

一戸 雅 聡 (ICHINOHE MASAOKI)
筑波大学・数理物質系・准教授
研究者番号: 90271858
リー ウラディミール (LEE VLADIMIR)
筑波大学・数理物質系・講師
研究者番号: 90375410
中本 真晃 (NAKAMOTO MASAOKI)
筑波大学・数理物質系・講師
研究者番号: 90334044