

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24年 5月 11日現在

機関番号：12102
 研究種目：基盤研究(S)
 研究期間：2007～2011
 課題番号：19105001
 研究課題名（和文）低配位及び多重結合高周期典型元素化合物の創製と物性に関する系統的研究
 研究課題名（英文）Research on Low-Coordinate and Multiply-Bonded Compounds of Heavier Main Group Elements
 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

研究成果の概要（和文）：不安定で合成困難と考えられてきた種々の低配位及び多重結合高周期典型元素化合物について、立体保護のために独自に開発した置換基を用い、合成手法に関しても従来法にとらわれることのない自由な分子設計が可能な新しい方法論を開拓した。低配位のケイ素及び関連する高周期 14 族元素化合物の創製、構造・物性と反応の多様性を追求し、新しい化学結合をもつ多重結合ケイ素化合物、ケイ素、ゲルマニウム、スズなどのラジカル種、カチオン種、アニオン種、イオンラジカル種、環状高周期 14 族元素を配位子とした遷移金属錯体などを安定な化合物として創製し、未踏の元素化学を開拓した。

研究成果の概要（英文）： We have developed novel sophisticated synthetic strategies for the preparation of highly challenging classes of low-coordinate derivatives of the heavier main group elements (multiply-bonded compounds such as disilynes with silicon-silicon triple bonds, isolable Si-, Ge-, and Sn-centered cations, radicals, and anion- and cation-radicals, Si and Ge heterocycles and their uses as ligands for transition metals etc.). We also performed the detailed analysis of their structural and synthetic properties, and carried out the systematic study of the basic similarities and differences between these new species and their organic analogues.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	44,200,000	13,260,000	57,460,000
2008年度	10,400,000	3,120,000	13,520,000
2009年度	10,400,000	3,120,000	13,520,000
2010年度	10,400,000	3,120,000	13,520,000
2011年度	10,500,000	3,150,000	13,650,000
総計	85,900,000	25,770,000	111,670,000

研究分野：化学

科研費の分科・細目：基礎化学・有機化学

キーワード：元素化学，高周期典型元素，錯体，常磁性，パイ電子，芳香族

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特徴づけ

るという観点に基づいて、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。研究代表者らが主たる研究対象として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）の化学にお

いては、研究代表者らの研究成果を含め大きく発展してきた。有機化合物の多様性は、炭素における結合様式の多様性、例えば二重結合や三重結合、あるいは芳香族性、アニオン、カチオンなどの中間体が安定に存在することに起因している。同じ結合様式をもつ高周期元素類縁体も存在すると考えられるが、研究を開始した当初は、それら全てが解明されてはいなかった。このような研究背景の下、研究代表者らは炭素と同族の高周期元素における基礎的且つ重要な反応性中間体の単離、構造解析、化学的・物理的性質の解明に取り組み、新たな「低配位及び多重結合高周期典型元素化合物の創製と物性を解明」といった成果を挙げてきた。その研究成果は、有機化学に限らず幅広い物質科学への波及効果をもたらすと期待されている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、研究代表者らが 14 族元素を中心として推進してきた低配位及び多重結合高周期 14 族元素化合物の化学を典型元素一般に拡張し、炭素化合物との比較検討を系統的に行うことによって、新しい高周期典型元素化学の確立を目指した。この目的を達成するために、本研究では、新しい結合と構造を持つ一連の低配位及び多重結合高周期典型元素化合物を創出し、その結合・構造と反応性を、対応する炭素化合物のものと比較し明らかにし、優れて普遍性のある典型元素化合物の構造論と反応論を作り上げる。具体的に、1) 高周期典型元素のうち 13-15 族元素を骨格とする多重結合化合物、2) 高周期典型元素芳香族化合物、3) 高周期典型元素常磁性化合物の新規な合成手法の開発、構造、反応性の実験的解析を通して本領域を体系化する。即ち、低配位及び多重結合高周期典型元素化合物の合成法を開発し、多種多様な化合物の系統的合成、構造解析、化学的・物理的性質の解明に取り組み、高周期典型元素化合物の構造論、反応論を実験化学・計算化学の両面から展開し、有機典型元素化学の新領域を開拓することを研究の目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、これまで申請者らが取り組んできたケイ素、ゲルマニウム、スズなどの高周期 14 族元素に関する研究の核である「低配位及び多重結合高周期 14 族元素化合物の化学」を典型元素一般に拡張し、1) 高周期典型元素の中でも特に 13-15 族元素を骨格とする多重結合化合物の研究、2) 高周期典型元素芳香族化合物の研究、3) 高周期典型元素常磁性化合物の新規な合成手法の開発、構造、反応性の解明に関する研究を中心に検討した。

4. 研究成果

(1) 高周期典型元素多重結合化合物に関する研究：ケイ素-ケイ素三重結合化合物ジシリンは、構造化学的にも反応化学的にも炭素アセチレンとは著しく異なるため特異な π 空間を創出し、その結果、原理的に新規な反応場を形成することを明らかにした。ジシリンの構造はトランスに折れ曲がったケイ素-ケイ素三重結合である。直線構造の三重結合では π 及び π^* 軌道はそれぞれ縮退しているが、トランス折れ曲がり三重結合では π 及び π^* 軌道の縮退が解け、面外対称・面内非対称の π 及び π^* 軌道を有する。さらに π 軌道準位はアセチレンのそれと比較すると著しく高く、逆に π^* 軌道準位は著しく低いなどの炭素アセチレンとは異なる特徴、反応性を示すことを見出した (図 1)。これが本研究で得られた最も重要な新発見である。

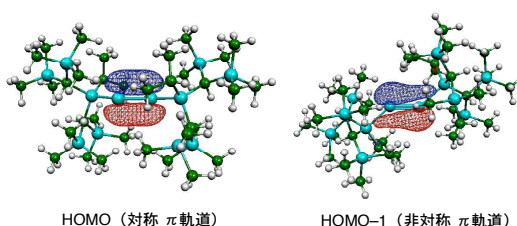
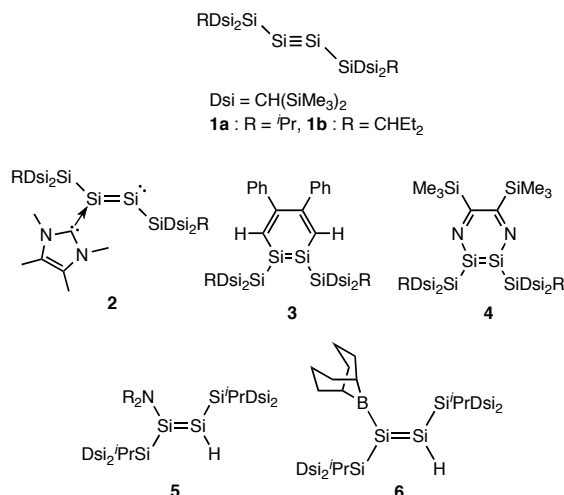


図 1 ジシリンの非等価な占有 π 軌道

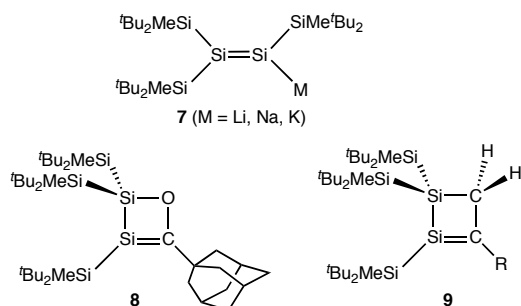
三重結合ケイ素化合物ジシリンは、特異な π 空間を創出し、炭素アセチレンには見られない反応場を形成することを明らかにした。例えば、N-ヘテロ環カルベン(NHC)は、ジシリン **1a** の面内非対称 π^* 軌道 (LUMO) と相互作用し、NHC の強い σ 供与性によって二重結合ケイ素上に非共有電子対を有する新しいタイプの低配位ケイ素化合物 **2** を生成した。また、ジシリン **1a** とアルキンとの反応は、炭素-炭素 π 軌道との相互作用、環拡大反応、第二のアルキン分子の環化付加、原子価異性化を経て、ジシラベンゼン **3** を与えることを明らかにした。この反応は、無触媒下でジシリンとアセチレン類との [2 + 2 + 2] 環化付加反応が起こるもので金属触媒を利用した炭素アセチレンの三量化反応と大きく異なる。窒素原子を含むジアザジシラベンゼン **4** もシリルシアニドとの反応で合成した。ジシリン **1a** は、アルコール、アミンやチオールなどと容易に付加反応を起こすため、従来合成の困難であった **5** などのヘテロ元素が置換した二重結合ケイ素化合物の合成法を構築した。また、ヒドロホウ素化反応も検討し、B-H 結合がケイ素三重結合にアンチ付加し、**6** を生成することを見出し、炭素の類縁体であるアセチレンのヒドロホウ素化反応と付加反応の機構が異なることを明らかにした。以上の反応は副生成物を全く生じない新反応であり、新しい含ケイ素 π 結合形成反

応として注目されている。



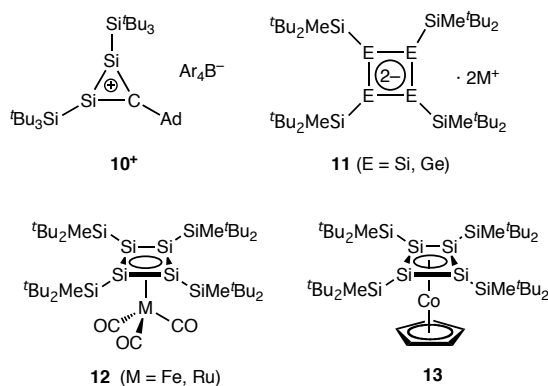
また、新規置換基を有するケイ素-ケイ素三重結合化合物ジシリン **1b** を合成することにも成功した。先に合成した Dsi_2PrSi -置換ジシリン **1a** と比較して、骨格 Si-Si 結合長は 2.045 Å と約 0.015 Å 短縮化がみられ、ジシリン **1a** よりも直線に近い構造であった。ジシリン **1b** の ^{29}Si NMR では 77.1 ppm に三重結合ケイ素に帰属されるシグナルが観測された。この値は、先に合成されたジシリン **1a** の骨格ケイ素 89.9 ppm と比較して置換基の電子的摂動がほとんど同じであるにも関わらず約 12 ppm も高磁場にシフトしており、骨格ケイ素の化学シフト値は、分子がより直線に近づくに従って sp 混成の環電流 π 電子による遮蔽が大きくなり、高磁場シフトすると考えられる。

ケイ素-ケイ素二重結合化合物の還元的結合開裂反応によって二重結合ケイ素上の置換基を切断し、ビニルアニオンのケイ素類縁体であるジシレニドを合成し、種々の求電子試剤との反応で環状二重結合ケイ素化合物 **8** や **9** の合成法も開拓した。

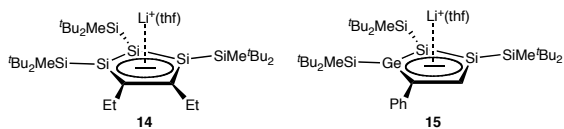


(2) 高周期典型元素芳香族化合物に関する研究：本研究では、芳香族化合物の中で最も基本的な化合物である高周期 14 族元素シクロプロペニリウムイオンをはじめ、シクロブタジエンジアニオン、シクロペンタジエニド

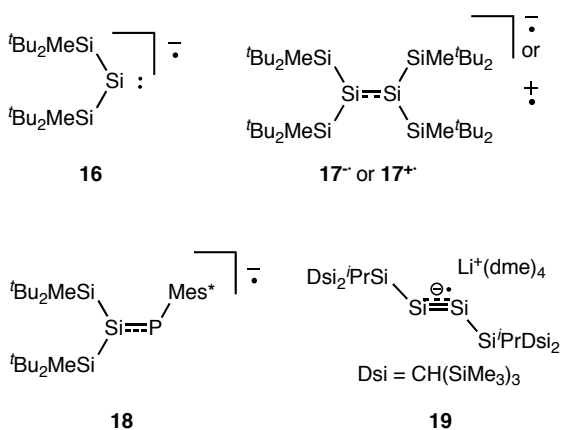
イオン、ジシラベンゼンなどの一連の芳香族性高周期 14 族元素化合物に関する実験的研究を推進するとともに、理論計算との連携によりメタロアロマティシティーの概念を構築し、高周期元素における芳香族性の定義に係わる検証を行った。対象とした研究は、1) 高周期元素シクロプロペニリウムイオンの合成と芳香族性、2) 高周期元素シクロブタジエンジアニオンの合成と高周期元素シクロブタジエン遷移金属錯体の合成、3) 環状シリレン遷移金属錯体の合成、構造、及びホモ芳香族性、4) 芳香族性トリシラシクロペンタジエニドの合成と遷移金属への錯化に関するものである。また、各種分光法・X 線結晶構造解析・反応性および理論計算を行うことで、高周期元素芳香族化合物の構造的・電子的性質を系統的に明らかにした。骨格がケイ素原子 2 個と炭素原子 1 個からなるハイブリッド型芳香族化合物ジシラシクロプロペニリウムイオン **10*** を対応する Ar_4B^- 塩として合成・単離することにも成功した。 ^{29}Si NMR スペクトルではシリルカチオンに特徴的な低磁場領域である 208.2 ppm にシグナルが観測され、 ^{13}C NMR スペクトルもまた低磁場領域である 253.7 ppm にシグナルを与えた。それらの化学シフト値は溶媒、対アニオンに依存せず、**10*** は溶媒とも対アニオンとも相互作用の無いフリーなカチオン種であることが分かった。また、高周期元素シクロブタジエンジアニオン **11** を鍵反応剤として、これを用いた遷移金属への錯化を行い、(η^4 -テトラシラシクロブタジエン)トリカルボニル鉄錯体 **12** や(η^4 -テトラシラシクロブタジエン)コバルト Cp 錯体 **13** の合成を達成した。また、対応する炭素配位子との比較を行うことで、配位子としての高周期元素の構造的・電子的性質を明らかにした。



シクロペンタジエニドの高周期元素類縁体となるトリシラシクロペンタジエニド **14** 及び関連化合物 **15** の合成にも成功した。五員環は平面構造であり、アニオン電荷は非局在化した 6π 電子系芳香族化合物であることを明らかにした。



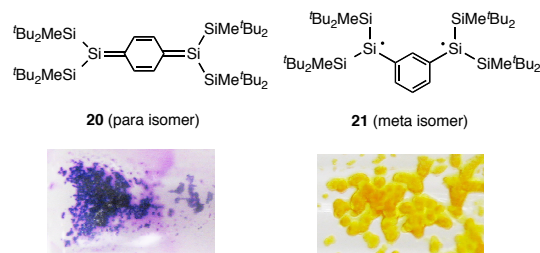
(3) 高周期典型元素常磁性化合物に関する研究：安定な化学種として合成に成功したケイ素＝ケイ素二重結合化合物ジシレンを基盤とする常磁性化学種への展開としてイオンラジカル種の生成とその物性について検討した。ジシレンの酸化還元反応を検討したところ、アルカリ金属の化学量論や配位子制御によりケイ素二価化学種シリレンのアニオンラジカル **16** やジシレンアニオンラジカル **17⁻** を、酸化反応ではジシレンカチオンラジカル **17⁺** を作り分けられることを見出した。また、高周期典型元素ヘテロ二重結合化合物としてケイ素＝リン二重結合化合物のアルカリ金属を用いた 1 電子還元により対応するアニオンラジカル **18** の合成に成功し、配位性溶媒中では対カチオンとの相互作用の無いフリーなアニオンラジカルとして存在することを明らかにした。ケイ素三重結合化合物ジシリンは当量のアルカリ金属との反応で容易に 1 電子還元が進行し、対応するアニオンラジカル **19** を溶媒和分離イオン対及びアルカリ金属イオンが *sp* ケイ素と相互作用した接触イオン対として単離することに成功し、それぞれの分子構造を決定した。ジシリニアニオンラジカルは、中性ジシリンと同様なトランス折れ曲がり構造を持ち、ケイ素＝ケイ素三重結合部位の伸長、折れ曲がり角の縮小が認められた。ジシリンの最低非占有軌道は面内非対称 π^* 軌道であり、これに 1 電子を収容し、かつ軌道準位を下げて安定化することを反映した構造変化が引き起こされていることが示された。また、溶液の電子スピン共鳴スペクトルの解析も含め、ジシリニアニオンラジカルでは陰電荷及びス



ピンが Si-Si 三重結合部位に非局在化した電子状態を持つ事を明らかにした。

また、2つのケイ素ラジカルを一般的な π

スパーサーであるベンゼン環の *p*-位及び *m*-位に集積させたビス(シリラジカル)の合成及び単離に成功し、パラ体が基底一重項のキノイド構造 **20** を持つ一方メタ体 **21** が高スピン基底三重項状態を持つことを明らかにした。



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)

[雑誌論文] (計 6 6 件)

- ① K. Takeuchi, M. Ichinohe, A. Sekiguchi, A New Disilene with π -Accepting Groups from the Reaction of Disilyne $\text{RSi}=\text{SiR}$ ($\text{R} = \text{Si}^i\text{Pr}[\text{CH}(\text{SiMe}_3)_2]$) with Isocyanides. *J. Am. Chem. Soc.*, **134**, 2954-2957 (2012). doi.org/10.1021/ja212065a. (査読有)
- ② T. Yamaguchi, M. Asay, A. Sekiguchi, $[(\text{Me}_3\text{Si})_2\text{CH}]_2\text{PrSi}(\text{NHC})\text{Si}=\text{Si}(\text{Me})\text{Si}^i\text{Pr}[\text{C}(\text{H}(\text{SiMe}_3)_2)_2]^+$: A Molecule with Disilynyl Cation Character. *J. Am. Chem. Soc.*, **134**, 836-839 (2012). doi.org/10.1021/ja210669n. (査読有)
- ③ K. Takeuchi, M. Ichinohe, A. Sekiguchi, Access to a Stable Si_2N_2 4-Membered Ring with Non-Kekulé Singlet Biradical Character from a Disilyne. *J. Am. Chem. Soc.*, **133**, 12478-12481 (2011). doi.org/10.1021/ja2059846. (査読有)
- ④ T. Nozawa, M. Nagata, M. Ichinohe, A. Sekiguchi, Isolable *p*- and *m*- $[(\text{Bu}_2\text{MeSi})_2\text{Si}]_2\text{C}_6\text{H}_4$: Disilaquinodimethane vs. Triplet Bis(silyl radical). *J. Am. Chem. Soc.*, **133**, 5773-5775 (2011). doi.org/10.1021/ja2014746. (査読有)
- ⑤ V. Ya. Lee, Y. Ito, H. Yasuda, A. Sekiguchi, From Tetragermacyclobutene to Tetragermacyclobutadiene Dianion to Tetragermacyclobutadiene Transition Metal Complexes. *J. Am. Chem. Soc.*, **133**, 5103-5108 (2011). doi.org/10.1021/ja111596g. (査読有)
- ⑥ Y. Murata, M. Ichinohe, A. Sekiguchi, Unsymmetrically Substituted Disilyne $\text{Dsi}_2^i\text{PrSi-Si}=\text{Si-SiNpDsi}_2$ ($\text{Np} = \text{CH}_2^i\text{Bu}$): Synthesis and Characterization. *J. Am. Chem. Soc.*, **132**, 16768-16770 (2010).

- doi. 10.1021/ja1091744. (査読有)
- ⑦ T. Yamaguchi, A. Sekiguchi, M. Driess, A N-Heterocyclic Carbene (NHC)–Disilyne Complex and Its Unusual Reactivity toward ZnCl_2 . *J. Am. Chem. Soc.*, **132**, 14061-14063 (2010). doi. 10.1021/ja107160g. (査読有)
- ⑧ K. Takeuchi, M. Ikoshi, M. Ichinohe, A. Sekiguchi, Addition of Amines and Hydroborane to the Disilyne $\text{RSi}\equiv\text{SiR}$ ($\text{R} = \text{Si}^i\text{Pr}[\text{CH}(\text{SiMe}_3)_2]$) Giving Amino- and Boryl-substituted Disilenes. *J. Am. Chem. Soc.*, **132**, 930-931 (2010). doi. 10.1021/ja910157h. (査読有)
- ⑨ H. Yasuda, V. Ya. Lee, A. Sekiguchi, η^5 -1,2,3-Trisilacyclopentadienyl – A Ligand for Transition Metal Complexes: Rhodium Half-Sandwich and Ruthenium Sandwich. *J. Am. Chem. Soc.*, **131**, 9902-9903 (2009). doi. 10.1021/ja9038664. (査読有)
- ⑩ H. Yasuda, V. Ya. Lee, A. Sekiguchi, Si_3C_2 -Rings: From a Nonconjugated Trisilacyclopentadiene to an Aromatic Trisilacyclopentadienide and Cyclic Disilenide. *J. Am. Chem. Soc.*, **131**, 6352-6353 (2009). doi. 10.1021/ja901881z. (査読有)
- ⑪ K. Takashi, V. Ya. Lee, T. Yokoyama, A. Sekiguchi, Base-Free Molybdenum and Tungsten Bicyclic Silylene Complexes Stabilized by a Homoaromatic Contribution. *J. Am. Chem. Soc.*, **131**, 916-917 (2009). doi. 10.1021/ja8088313. (査読有)
- ⑫ S. Inoue, M. Ichinohe, A. Sekiguchi, The Isolable Cation-radical of Disilene: Synthesis, Characterization, and a Reversible One-electron Redox System. *J. Am. Chem. Soc.*, **130**, 6078-6079 (2008). doi. 10.1021/ja801761w. (査読有)
- ⑬ A. Sekiguchi, T. Tanaka, M. Ichinohe, K. Akiyama, P. P. Gaspar, Tri-*tert*-butylsilylsilylenes with Alkali Metal Substituents ($(\text{Bu}_3\text{Si})\text{SiM}$ ($\text{M} = \text{Li}, \text{K}$): Electronically and Sterically Accessible Triplet Ground States. *J. Am. Chem. Soc.*, **130**, 426-427 (2008). doi. 10.1021/ja077628v. (査読有)
- ⑭ M. Igarashi, M. Ichinohe, A. Sekiguchi, Air-Stable Disilacyclopropene with a Si=C bond and Its Conversion to Disilacyclopropenylum Ion: Silicon–Carbon Hybrid 2π -Electron Systems *J. Am. Chem. Soc.*, **129**, 12660-12661 (2007). doi. 10.1021/ja075740n. (査読有)
- ⑮ R. Kinjo, M. Ichinohe, A. Sekiguchi, N. Takagi, M. Sumimoto, S. Nagase, Reactivity of a Disilyne $\text{RSi}\equiv\text{SiR}$ ($\text{R} = \text{Si}^i\text{Pr}[\text{CH}(\text{SiMe}_3)_2]$) toward π -Bonds: Stereospecific Addition and a New Route to an Isolable 1,2-Disilabenzene. *J. Am. Chem. Soc.*, **129**, 7766-7767 (2007). doi. 10.1021/ja072759h. (査読有)
- ⑯ S. Inoue, M. Ichinohe, A. Sekiguchi, Isolable Silylene Anion Radical: Structural Characteristics in the Solid State and in Solution. *J. Am. Chem. Soc.*, **129**, 6096-6097 (2007). doi. 10.1021/ja0711314. (査読有)
- [学会発表] (計 255件)
- ① A. Sekiguchi, "New π -bonded Molecules: Disilyne $\text{RSi}\equiv\text{SiR}$ ($\text{R} = \text{Si}^i\text{Pr}[\text{CH}(\text{SiMe}_3)_2]$) with a Silicon-Silicon Triple Bond and Its Unusual Reactivity toward NHC", The 15th Korea-Japan Joint Symposium on Organometallic and Coordination Chemistry for Renewable Energy Research, October 7, 2011, Ramada Plaza Hotel, Jeju, Korea.
- ② A. Sekiguchi, "Ion Radicals of Unsaturated Silicon Compounds: The Cation-Radical and Anion-Radical of Disilene, and the Anion-Radical of Disilyne", The 2010 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (Pacifichem), December 17, 2010, Honolulu, Hawaii, USA.
- ③ A. Sekiguchi, "New π -bonded Molecules: Disilynes $\text{RSi}\equiv\text{SiR}$ with Silicon-Silicon Triple Bonds and Their Unusual Reactivity", The 2010 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (Pacifichem), December 16, 2010, Honolulu, Hawaii, USA.
- ④ A. Sekiguchi, "Anion-Radicals of Disilene, Anion-Radical of Disilyne", 3rd Asian Silicon Symposium (ASiS III), October 18, 2010, Hangzhou, China.
- ⑤ A. Sekiguchi, "New π -Bonded Molecules: Disilynes $\text{RSi}\equiv\text{SiR}$ with Silicon-Silicon Triple Bonds and Their Unusual Reactivity", 24th International Conference on Organometallic Chemistry, July 20, 2010, Taipei, Taiwan.
- ⑥ A. Sekiguchi, "Germanium Unsaturated Ring Systems with Aromaticity and Homoaromaticity", 13th International Conference on the Coordination and Organometallic Chemistry of Germanium Tin and Lead, July 12, 2010, Graz, Austria.
- ⑦ A. Sekiguchi, "New π -bonded Molecules: Disilynes with a Silicon-Silicon Triple Bond and Its Unusual Reactivity", 43rd Silicon Symposium, May 22, 2010, University of Missouri-St. Louis, USA.
- ⑧ A. Sekiguchi, "New Heavy Ligands:

Transition Metal Complexes of Tetrasilacyclobutadiene and Bicyclic Silylene", 5th European Silicon Days, Sep 22, 2009, Vienna, Austria.

- ⑨ A. Sekiguchi, "The Chemistry of Disilyne with a Silicon-Silicon Triple Bond: A New Entry to Multiple Bond Chemistry", 42nd IUPAC Congress, Aug 5, 2009, Glasgow, Scotland, UK.
- ⑩ A. Sekiguchi, "A New Type π -Bonded Compound: The Chemistry of a Silicon-Silicon Triple Bond", The International Symposium on Reactive Intermediates and Unusual Molecules (ISRIUM2009), July 9, 2009, the Liblice Castle near Prague, Czech Republic.
- ⑪ A. Sekiguchi, "Disilyne with a Silicon-Silicon Triple Bond: A New Entry to Multiple Bond Chemistry", The 15th International Symposium on Organosilicon Chemistry (ISOSXV), June 5, 2008, Jeju, Korea.
- ⑫ A. Sekiguchi, "Multiple Bonded Silicon Chemistry: From Double Bond to Triple Bond", 4th European Silicon Days, Sep. 11, 2007, Bath, UK.
- ⑬ A. Sekiguchi, "Disilyne with a Silicon-Silicon Triple Bond: A New Entry to Multiple Bond Chemistry", International Conference on Heteroatom Chemistry, Aug. 13, 2007, Riverside, California, USA.

[図書] (計16件)

- ① V. Ya. Lee and A. Sekiguchi, Organometallic Compounds of Low-Coordinate Si, Ge, Sn and Pb: From Phantom Species to Stable Compounds (431 pages). John Wiley and Sons, Ltd., 2010.
- ② V. Ya. Lee and A. Sekiguchi, Strained Hydrocarbons. Beyond the van't Hoff and Le Bel Hypothesis; H. Doziuk Ed.; Wiley-VCH, Chapter 2, 82-102 (2009).
- ③ M. Nanjo and A. Sekiguchi, Polysilane Dendrimers. Silicon Containing Dendritic Polymers; P. R. Dvornic and M. J. Owen Eds.; Springer, Chapter 4. 75-96 (2009).
- ④ 関口 章, 新しい π 電子系化合物-ジシリンの化学: 特集/未来技術基盤としてのパイ電子科学, 化学工業, **60**, 47[863]-52[868] (2009).
- ⑤ 関口 章, 革新論文から見たこの10年の進歩と未来, 元素化学におけるブレークスルー, 別冊化学(化学同人) 54-58 (2009).
- ⑥ 関口 章, ケイ素多重結合の形成: ジシリルン化学からジシリルン化学へ, 『化学と工業』誌8月号特集「有機ケイ素化学」, **61**, 785-788 (2008).

- ⑦ V. Ya. Lee and A. Sekiguchi, Silicon-, Germanium-, and Tin-Centered Cations, Radicals, and Anions. Reviews of Reactive Intermediate Chemistry. Eds.: M. S. Platz, R. A. Moss, M. Jones, Jr., Wiley, Chapter 2, 47-120 (2007).

[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) 研究分担者

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