

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2023

課題番号：19K05482

研究課題名(和文) 不斉自己触媒反応を用いるキラル有機化合物のホモキラリティー起源の解明

研究課題名(英文) Elucidation of the Origin of Homochirality of Chiral Organic Compounds by Using Asymmetric Autocatalysis

研究代表者

そ合 憲三 (Soai, Kenso)

早稲田大学・ナノ・ライフ創新研究機構・その他(招聘研究員)

研究者番号：90147504

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：生物はL-アミノ酸など実像と鏡像の関係にあって重ね合わせることができない鏡像異性体のうち一方のみから構成されており(ホモキラリティー)、その起源の解明は生命の起源に至る化学進化における謎である。鏡像体過剰率が増幅する不斉自己触媒(Soai)反応を用いて、アキラルなグリシンや2-ピリドン等が形成するキラル結晶存在下でSoai反応を行い、これらのキラル結晶がホモキラリティーの起源として有効であることを見出した。さらに不斉要因無しで、固相-気相条件下でのSoai反応による絶対不斉合成を実現した。本研究成果はホモキラリティーの成立過程を具現化し、ホモキラリティーに関する認識を深化させるものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

生命はL-アミノ酸を用いており、D型との混合物では生命は成り立たない。生命の起源の解明には、分子のホモキラリティーが成立した化学進化の過程解明が不可欠である。本研究成果は不斉自己触媒反応でホモキラリティー成立の過程を実現したものである。不斉起源とは考えられていなかったグリシンのガンマ結晶存在下、不斉自己触媒(Soai)反応によりホモキラリティーに到達すること、さらに不斉要因無しで絶対不斉合成を実現し、長年の有機化学の常識を覆した。キラル有機化合物がホモキラリティーに至った化学過程が明らかでなかったのに対し、明確な化学過程により可能であることを実証しホモキラリティーに対する認識をより深めた。

研究成果の概要(英文)：Living organisms are composed of only one of the enantiomers that cannot be superimposed, such as L-amino acids, which have a relationship of real and mirror images (homochirality). The elucidation of their origin and process is a mystery in the chemical evolution leading to the origin of life. Aiming to elucidate the origin of homochirality, we found that by conducting the Soai reaction, an asymmetric autocatalytic reaction that amplifies the enantiomeric excess, in the presence of chiral crystals formed by achiral compounds such as glycine and 2-pyridone, these could effectively act as the origin of homochirality. Furthermore, absolute asymmetric synthesis was achieved under solid-gas conditions without any chiral factors. The results of this study deepen our understanding of the process of establishing homochirality.

研究分野：有機合成化学，不斉自己触媒，キラル化学，生命の起源

キーワード：不斉自己触媒 結晶 不斉認識 ホモキラリティー 不斉の起源 the Soai reaction 不斉触媒 反応有機化学 キラル

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地球上の全ての生命はL-アミノ酸、D-糖質から構成されており、これはホモキラリティーと呼ばれている。生体関連化合物がホモキラリティーに至った化学進化の解明は、生命の起源を探る上で未解決の謎とされている。研究代表者らが見出した「峽合(そあい)反応(the Soai reaction)」は、ピリミジルアルコールが不斉自己触媒として作用し、ピリミジン-5-カルバルデヒドとジイソプロピル亜鉛の反応において、自己と同一構造・同一絶対配置のピリミジルアルコールを自己増殖するものである。しかも、初めに鏡像体過剰率が低い不斉自己触媒を用いても、反応中に鏡像体過剰率が著しく増幅し、極めて高い鏡像体過剰率に到達するという極めて独創的なものである。本反応では、右または左水晶等のキラル無機結晶の存在下や、右または左円偏光を不斉開始剤として、開始剤のキラリティーと関連した絶対配置の生成物が極めて高い鏡像体過剰率で生成する。このように、Soai 反応がホモキラリティーの起源を解明する有効な手段となり得ることが明らかにされつつあり、さらに Soai 反応の反応機構解明を目指す研究が活発に行われていた。

2. 研究の目的

生命を構成するキラル有機化合物が高い鏡像異性体過剰率(ホモキラリティー)に至った化学過程を解明することは、生命の起源解明にも関連する課題である。本研究では、鏡像体過剰率が顕著に増幅する不斉自己触媒反応 (Soai 反応) を用いて、有機化合物のホモキラリティーの起源を明らかにすることを目的とする。ホモキラリティーの起源として、アキラル有機化合物が形成するキラル結晶や、不斉要因を用いない自発的な絶対不斉合成について検討する。

新しいホモキラリティーの起源要因として、電場の向きにより分子キラリティーを制御することを目的とし、硫酸トリグリシン(TGS)結晶に印加する電場の向きを制御することにより、硫酸トリグリシン結晶のキラリティーを制御し、この結晶を不斉開始剤として Soai 反応を行い、関連する絶対配置を持つ高い鏡像体過剰率のキラル有機化合物を生成させる。さらに Soai 反応の触媒会合状態を解明して、キラリティーの偏りの向上の仕組みを解明する。また、キラルでない(アキラルな)有機化合物が形成するキラル結晶が、峽合反応においてホモキラリティーの起源として作用することを示す。さらに峽合反応が、一般に結晶キラリティーとキラル有機化合物を関連付けることができることを示す。

3. 研究の方法

ピリミジン-5-カルバルデヒドとジイソプロピル亜鉛をホモキラリティーの起源となり得る要因存在下で作用させると、要因のキラリティーの偏りの向きに相関して僅かにキラリティーが偏ったピリミジルアルコール(亜鉛アルコキシド)が反応系中に生じ、引き続く不斉自己触媒反応 (Soai 反応) により、鏡像体過剰率が高いピリミジルアルコールを生じさせる。これにより、ホモキラリティーの起源要因がキラル有機化合物の不斉起源として有効であるか否かを検証する。

キラルでない(アキラルな)有機化合物には、形成する結晶がキラリティーを有するものが知られている。キラル結晶をホモキラリティーの起源としてその存在下で、ピリミジン-5-カルバルデヒドにジイソプロピル亜鉛を作用させ、系中での生成物(ピリミジルアルコール亜鉛アルコキシド)に僅かなキラリティーの偏りを生じさせ、引き続く不斉自己触媒反応により、初期に生じたキラリティーの偏りを増幅させる。生じた鏡像体過剰率が高いピリミジルアルコールの絶対配置とホモキラリティー要因の相関を検証することで、ホモキラリティーの起源としての有効性を明らかにする。アキラルな化合物としては、アミノ酸であるグリシンや 2-ピリドン等を用いる。さらに、印加する電場方向によりキラリティーが制御される硫酸トリグリシン結晶を峽合反応の不斉開始剤に用いて、電場の向きを変換することにより、キラル有機化合物のキラリティーの制御を検討する。また、有機化学者の長年の夢である絶対不斉合成、すなわちホモキラリティーの要因無しでピリミジン-5-カルバルデヒドとジイソプロピル亜鉛を作用させ、引き続く不斉自己触媒反応を行って R 体または S 体のピリミジルアルコールを生成させ、その統計的分布を検証することにより絶対不斉合成を行う。また、峽合反応の触媒の溶液中での会合状態を解明するために円二色性(CD)スペクトル測定を行う。

4. 研究成果

(1)アキラル(キラルでない)なアミノ酸グリシンが形成するキラル結晶が峽合反応においてホモキラリティーの起源として作用する:グリシンは、タンパク質を構成する 20 種類のアミノ酸のうち、唯一のアキラル(キラルでない)なアミノ酸であり(他の 19 種類のアミノ酸はL型)、これまではホモキラリティーの起源にはなり得るとは考えられていなかった。グリシンの結晶多形のうち安定なガンマ型はキラルであるが、結晶の絶対構造は不明であった。我々はキラルなガンマ-グリシン結晶の円二色性(CD)スペクトルとX線結晶構造解析により絶対構造との関連を明らかにした。さらに CD(-)の左(回転)形グリシン結晶存在下でピリミジン-5-カルバルデヒド

とジイソプロピル亜鉛を反応させて Soai 反応を行うと (*S*)-ピリミジルアルカノールが極めて高い鏡像体過剰率で生成することを見出した。一方, CD(+) の右(回転)形グリシン結晶存在下では, (*R*)-ピリミジルアルカノールが生成することを明らかにした。すなわち, グリシンは唯一のアキラルなアミノ酸であるので, 従来はホモキラリティーの起源とはなり得ないと考えられていたのが, ガンマーグリシン結晶を Soai 反応と組み合わせることにより, キラル有機化合物のホモキラリティーの起源となり得ることを示したものである。本研究成果は, アキラルなグリシンが, キラルなガンマーグリシン結晶を形成し, これが Soai 反応と組み合わせることにより, ホモキラリティーの起源となり得ることを明らかにした極めてユニークなものである。グリシンは隕石中に含まれているアミノ酸にはキラリティーの偏りが検出された報告が複数あるが, 従来グリシンは, アキラル物質としてキラリティーの問題からは除外されて来た。これに対して本研究成果は, ホモキラリティーの起源におけるグリシンの役割を明確に示すものである。

(2) 固相-気相条件下での自発的な絶対不斉合成の実現: キラルな要因無しでキラリティーが偏ったキラル化合物を生成することは絶対不斉合成と呼ばれ, ホモキラリティーの起源として長年興味を集めている。ピリミジン-5-カルバルデヒドの粉末結晶に, ジイソプロピル亜鉛のトルエン溶液を気相状態で作用させて Soai 反応を開始することにより, (*R*)および(*S*)-ピリミジルアルカノールが統計的分布(61:58)に従って生成することを明らかにした。

不斉要因無しでキラリティーが偏ったキラル化合物を合成する反応は, 絶対不斉合成と呼ばれるが, その実現は長年の課題であった。従来の有機化学の常識は, 不斉要因無しでの反応では, キラリティーが偏らないラセミ体が生成する。本研究成果は, Soai 反応により不斉源無しでホモキラリティーに至る化学過程すなわち絶対不斉合成を実現した極めて意義深いものと言え, 従来の常識を覆すものである。

(3) 電場の印加方向によりキラリティーが逆転する硫酸トリグリシン(TGS)結晶を不斉開始剤とする碓合反応: TGS 結晶は, 印加する電場の方向によりキラリティーが逆転することが知られている。X線結晶構造解析により, キラリティーの逆転はグリシン1分子の(結合角)配座 *M*および *P*体の変換に由来するものであることを明らかにした。さらに *M*-TGS 存在下で Soai 反応を行うと (*S*)-ピリミジルアルカノールが, *P*-TGS 存在下では (*R*)-ピリミジルアルカノールが高い鏡像体過剰率で生成することを見出した。本成果は, 電場印加の方向を制御することにより, Soai 反応と組み合わせることでキラル生成物の絶対配置を制御できることを初めて明らかにしたものである。

(4) アキラルな有機化合物である 2-ピリドンおよび 3-アミノピリジンが形成するキラル結晶を不斉開始剤とする Soai 反応: 2-ピリドンおよび 3-アミノピリジンはキラルではない(アキラル)化合物であるが, キラル結晶を形成する。これらの 2-ピリドンキラル結晶[CD(-)波長 229 nm]存在下での Soai 反応では (*S*)-ピリミジルアルカノールが, また CD(-)結晶存在下では (*R*)-アルカノールが高い鏡像体過剰率で生成した。これにより, アキラルな 2-ピリドンおよび 3-アミノピリジンが形成するキラル結晶が, Soai 反応と組み合わせることにより, ホモキラリティーの起源として有効であることを明らかにした。

(5) オルト-テルフェニルのキラル結晶をホモキラリティーの起源とする Soai 反応: オルト-テルフェニルは, ベンゼンの隣り合う位置の 2 個の水素原子がフェニル基に置換された化合物であり, キラル結晶を形成する。*M*体結晶[CD(+)波長 291nm]存在下での碓合反応からは (*S*)-ピリミジルアルカノールが, *P*体結晶存在下では (*R*)-ピリミジルアルカノールが高い鏡像体過剰率で得られた。

(6) Soai 反応の溶液中における触媒会合状態の解明: Soai 反応において反応中に鏡像体過剰が向上する機構として反応中における触媒の会合が示唆されている。ピリミジルアルカノール亜鉛アルコキシド 4 量体を溶解し, CD スペクトルの変化から, 溶液中では 4 量体と 2 量体が平衡状態であることが示唆された。

(7) ピリミジルアルカノール, 5-カルバモイルピリミジルアルカノール, 3-キノリルアルカノールの不斉自己触媒反応 (Soai 反応) は, キラル化合物が自己複製するものでありホモキラリティーの起源を探る有効な手掛かりを与える: ピリミジルアルカノール, 5-カルバモイルピリミジルアルカノール, 3-キノリルアルカノールは不斉自己触媒として作用し, 対応するピリミジン-5-カルバルデヒド, 5-カルバモイルピリジン-3-カルバルデヒド, キノリン-3-カルバルデヒドとジイソプロピル亜鉛の反応で, 自己と同一絶対配置, 同一構造の生成物を与え, Soai 反応として知られている。本反応では, 初期の微小なキラリティーの偏りが不斉自己触媒反応の過程で著しく増幅し, ほぼ純粋な一方の鏡像異性体に到達する。ホモキラリティーの起源としていくつかの要因が提唱されているが, 殆どの場合, キラル有機化合物には微小のキラリティーの偏りを与えるに過ぎず, 生命に見られる極めて高い鏡像体過剰率との相関は長年の謎とされている。碓合反応は, 水晶, 辰砂などのキラル無機結晶, 右および左円偏光, 同位体置換により生じるキラル化合物, ガンマーグリシンなどアキラル化合物が形成するキラル結晶などがホモキラリティーの起源

となり、相関するキラリティーをもつ有機化合物を極めて高い鏡像体過剰率で与えることを示した。さらに、キラル要因を用いない自発的な絶対不斉合成を初めて砵合反応において実現した。以上、砵合(Soai)反応は自己複製(増殖)とホモキラリティーという生命の2つの特質を兼ね備えたものであり、生命のホモキラリティー成立の謎を解明する糸口を与えるものであると言える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Soai Kenso, Kawasaki Tsuneomi, Matsumoto Arimasa	4. 巻 52
2. 論文標題 Asymmetric Autocatalysis as an Efficient Link Between the Origin of Homochirality and Highly Enantioenriched Compounds	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Origins of Life and Evolution of Biospheres	6. 最初と最後の頁 57～74
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11084-022-09626-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Soai Kenso	4. 巻 124
2. 論文標題 The Soai reaction and its implications with the life's characteristic features of self-replication and homochirality	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Tetrahedron	6. 最初と最後の頁 133017～133017
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.tet.2022.133017	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 そ合憲三, 川崎常臣	4. 巻 70
2. 論文標題 キラリティの基礎および生命のホモキラリティの意義と起源	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 化学と教育	6. 最初と最後の頁 254-257
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tsuneomi Kawasaki, Yoshiyasu Kaimori, Seiya Shimada, Natsuki Hara, Susumu Sato, Kenta Suzuki, Toru Asahi, Arimasa Matsumoto, Kenso Soai	4. 巻 57
2. 論文標題 Asymmetric autocatalysis triggered by triglycine sulfate with switchable chirality by altering the direction of the applied electric field	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 5999-6002
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1039/D1CC02162A	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kenso Soai, Arimasa Matsumoto, Tsuneomi Kawasaki,	4. 巻 61
2. 論文標題 Asymmetric Autocatalysis as a Link Between Crystal Chirality and Highly Enantioenriched Organic Compounds	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Israel Journal of Chemistry	6. 最初と最後の頁 507-516
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ijch.202100047	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Arimasa Matsumoto, Ayame Tanaka, Yoshiyasu Kaimori, Natsuki Hara, Yuji Mikata, Kenso Soai	4. 巻 57
2. 論文標題 Circular Dichroism Spectroscopy of Catalyst Preequilibrium in Asymmetric Autocatalysis of Pyrimidyl Alkanol	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 11209-11212
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d1cc04206h	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kenso Soai, Tsuneomi Kawasaki, Arimasa Matsumoto	4. 巻 11
2. 論文標題 Role of Asymmetric Autocatalysis in the Elucidation of Origins of Homochirality of Organic Compounds	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Symmetry	6. 最初と最後の頁 694-
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/sym11050694	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Arimasa Matsumoto, Hanae Ozaki, Sumeru Tsuchiya, Toru Asahi, Meir Lahav, Tsuneomi Kawasaki, Kenso Soai	4. 巻 17
2. 論文標題 Achiral Amino Acid Glycine Acts as an Origin of Homochirality in Asymmetric Autocatalysis	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Organic and Biomolecular Chemistry	6. 最初と最後の頁 4200-4203
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c9ob00345b	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yoshiyasu Kaimori, Yui Hiyoshi, Tsuneomi Kawasaki, Arimasa Matsumoto, Kenso Soai	4. 巻 55
2. 論文標題 Formation of Enantioenriched Alkanol with Stochastic Distribution of Enantiomers in the Absolute Asymmetric Synthesis Under Heterogeneous Soli - vapor Phase Conditions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chemical Communications	6. 最初と最後の頁 5223-5226
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c9cc01875a	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Arimasa Matsumoto, Daisuke Tateishi, Tsuyoshi Nakajima, Shiori Kurosaki, Tomohiro Ogawa, Tsuneomi Kawasaki, Kenso Soai	4. 巻 36
2. 論文標題 Achiral 2-Pyridone and 4-Aminopyridine Act as Chiral Inducers of Asymmetric Autocatalysis with Amplification of Enantiomeric Excess via The Formation of Chiral Crystals	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Chirality	6. 最初と最後の頁 c23617
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/chir.23617	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tsuneomi Kawasaki, Daisuke Tateishi, Arimasa Matsumoto, Kenso Soai	4. 巻 152
2. 論文標題 Asymmetric Autocatalysis with Amplification of Enantiomeric Excess utilizing Chiral Crystals of Achiral o-Terphenyls as Chiral Triggers	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Tetrahedron	6. 最初と最後の頁 133835
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tet.2024.133835	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Daisuke Tateishi, Tomohiro Ogawa, Kento Yonemitsu, Kenso Soai, Tsuneomi Kawasaki
2. 発表標題 Chiral Crystal of Achiral Hydrocarbon, o-Terphenyl Induced Asymmetric Autocatalysis
3. 学会等名 Molecular Chirality Asia 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kenso Soai
2. 発表標題 Asymmetric Autocatalysis and the Elucidation of the Origin of Homochirality
3. 学会等名 Chiral Matter, Nobel Symposium 167 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kenso Soai
2. 発表標題 Asymmetric Autocatalysis and the Origin of Homochirality
3. 学会等名 Symposium on Molecular Chirality Asia 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kenso Soai
2. 発表標題 Asymmetric Autocatalysis and the Origin of Homochirality
3. 学会等名 Symposium Chirality at the Nanoscale (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenso Soai
2. 発表標題 Asymmetric Autocatalysis and the Origin of Homochirality
3. 学会等名 Seminar at The Federal Institute of Technology (ETH, Zurich) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenso Soai
2. 発表標題 不斉自己触媒反応の発見とホモキラリティーの起源研究 Discovery of Asymmetric Autocatalysis and the Study on the Origin of Homochirality
3. 学会等名 Takasago International Noyori Prize Award Lecture 有機合成化学協会（招待講演）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Kenso Soai
2. 発表標題 不斉自己触媒(Soai)反応におけるホモキラリティーの起源の研究
3. 学会等名 Japan Geoscience Union (JpGU) 2024（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計8件

1. 著者名 Kenso Soai, Tsuneomi Kawasaki, Arimasa Matsumoto	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Royal Society of Chemistry	5. 総ページ数 349
3. 書名 Asymmetric Autocatalysis: The Soai Reaction. An Overview, in "Asymmetric Autocatalysis: The Soai Reaction," Chap. 1, pp. 1-32, Eds. K. Soai, T Kawasaki, A. Matsumoto	

1. 著者名 Tsuneomi Kawasaki, Arimasa Matsumoto, Kenso Soai	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Royal Society of Chemistry	5. 総ページ数 349
3. 書名 Asymmetric Autocatalysis Initiated by Enantioenriched Chiral Organic Compounds: The Link between Circularly Polarized Light and Nearly Enantiopure Organic Compounds, in "Asymmetric Autocatalysis: The Soai Reaction," Chap. 2, pp. 33-42, Eds. K. Soai, T Kawasaki, A. Matsumoto	

1. 著者名 Arimasa Matsumoto, Tsuneomi Kawasaki, Kenso Soai	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Royal Society of Chemistry	5. 総ページ数 349
3. 書名 Asymmetric Autocatalysis Triggered by Chirality of Minerals, Organic Crystals and Surfaces, in "Asymmetric Autocatalysis: The Soai Reaction," Chap. 3, pp. 43-64, Eds. K. Soai, T Kawasaki, A. Matsumoto,	
1. 著者名 Kenso Soai, Tsuneomi Kawasaki, Arimasa Matsumoto	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Royal Society of Chemistry	5. 総ページ数 349
3. 書名 Absolute Asymmetric Synthesis in The Soai Reaction, in "Asymmetric Autocatalysis: The Soai Reaction," Chap. 4, pp. 65-74, Eds. K. Soai, T Kawasaki, A. Matsumoto	
1. 著者名 Arimasa Matsumoto, Tsuneomi Kawasaki, Kenso Soai	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Royal Society of Chemistry	5. 総ページ数 349
3. 書名 Structure Analysis of Asymmetric Autocatalysis by X-ray Crystallography and Circular Dichroism Spectroscopy, in "Asymmetric Autocatalysis: The Soai Reaction," Chap. 12, pp. 273-288, Eds. K. Soai, T Kawasaki, A. Matsumoto	
1. 著者名 Tsuneomi Kawasaki, Arimasa Matsumoto, Kenso Soai	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Royal Society of Chemistry	5. 総ページ数 349
3. 書名 Unusual Aspects of Asymmetric Induction and Amplification Observed in the Soai Reaction, in "Asymmetric Autocatalysis: The Soai Reaction," Chap. 14, pp. 317-338, Eds. K. Soai, T Kawasaki, A. Matsumoto	

1. 著者名 Kenso Soai	4. 発行年 2023年
2. 出版社 World Scientific	5. 総ページ数 266
3. 書名 Asymmetric Autocatalysis and the Elucidation of the Origin of Homochirality, in "Chiral Matter: Proceedings of the Nobel Symposium 167," Chap. 11, pp. 141-160, Eds. M. Larsson, E. Babaev, D. Kharzeev	

1. 著者名 Kenso Soai, Tsuneomi Kawasaki, Arimasa Matsumoto	4. 発行年 2023年
2. 出版社 CRC Press	5. 総ページ数 -
3. 書名 Asymmetric Autocatalysis and the Origins of Homochirality, in "Guidebook for Systems Applications in Astrobiology," Chapter 7.	

〔産業財産権〕

〔その他〕

The Soai Research Group https://www.rs.kagu.tus.ac.jp/soai/	
--	--

6. 研究組織			
	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	川崎 常臣 (Kawasaki Tsuneomi) (40385513)	東京理科大学・理学部第一部応用化学科・教授 (32660)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	朝日 透 (Asahi Toru) (80222595)	早稲田大学・理工学術院・教授 (32689)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
イスラエル	Weizmann Institute of Science		