

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H01154

研究課題名(和文) 大気中で起こる界面反応の本質的理解に向けた実験的研究

研究課題名(英文) Elucidation of reaction mechanisms at gas-liquid interfaces in the atmosphere

研究代表者

江波 進一 (Enami, Shinichi)

筑波大学・数理工学系・教授

研究者番号：00589385

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,700,000円

研究成果の概要(和文)：本提案研究では、気液界面反応測定手法を用いて、界面で起こる大気化学反応の研究を行った。また、瞬時に起こる液相反応をその場測定できる新規手法を開発し、気液界面反応vs液相反応を直接比較できる実験システムを構築した。気液界面で起こる反応の特殊性の起源に関する重要な知見が得られた。また、大気における界面反応とバルク反応をどのように定量的に区別して扱えばよいか明らかになった。今後、大気モデルへの取り込みなど、多くの成果が見込まれる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気候変動と大気汚染の問題は人類が解決すべき重大な環境問題である。これらの問題と密接に関連する大気中に浮遊する雲粒とエアロゾルの気液界面と液相で起こる化学反応機構の分子レベルでの理解は極めて重要である。本研究によって、気液界面で起こる反応の特殊性の起源の一部が初めて明らかになった。また、大気における界面反応とバルク反応をどのように定量的に区別して扱えばよいか明らかになった。今後、大気モデルへの取り込みなど、多くの成果が見込まれるため、重要である。

研究成果の概要(英文)：Atmospherically important reactions at the air-water interface were investigated by interface-sensitive spray ionization mass spectrometry. Furthermore, the dual-microjets mass spectrometry was developed for direct comparison between the interface vs bulk reaction mechanisms. The important knowledge on the origin of the interface-specific mechanisms was obtained. These results will be highly valuable for future atmospheric modeling.

研究分野：大気化学

キーワード：エアロゾル 界面 ラジラジカル 不均一反応 マルチフェーズ反応 環境 気候変動 大気汚染

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

地球環境には気相・液相・固相、そしてそれらの境界相(界面)を含む複数の相が複雑に関与する不均一な系が数多く存在する。重要なことに、地球の気候変動に影響を与えている大気エアロゾル(PM<sub>2.5</sub>に代表される空気中に浮遊する微粒子)の反応や、また生体内・生体表面で起こる反応の多くが不均一な系で起きている。例えば大気エアロゾルは通常、液体、固体、もしくはその中間のような状態として存在しており、気体オゾンや気体 OH ラジカルと不均一反応を起こし、常に変質し続けている。長鎖のカルボン酸によってコーティングされたエアロゾルは気体の OH ラジカルと不均一反応を起こすことで親水性が増加し、より多くの水分子を取り込むようになる。また気体オゾンによる不均一酸化反応を受けたエアロゾルはオゾンドや過酸化物質などの有害物質を含むようになる。このような光化学的「エイジング」によって大気エアロゾルの組成や粒径などが変化し、その結果、その放射強制力(気候に対して与える放射の大きさ)や毒性も同時に変化している。

このような不均一反応が起こる代表的な反応場が空気-水の界面などの気液界面である。大気に存在するエアロゾルの表面積をグローバルで換算すると地表の総面積の 100 倍以上にもなると言われており、その膨大かつ特殊な反応場で起こる反応メカニズムの分子レベルでの理解は特に重要である。しかし、従来の室内実験研究は、連続液滴法や濡れ壁反応管法などを用いた取り込み係数 $\gamma$ (気体分子の液体への衝突数に対する気体分子の消失数の比)の導出にとどまり、不均一反応機構そのものの理解はあまり進んでこなかった。これは、空気-水の界面で起こる反応を直接的に“その場”測定できる手法がなかったのが一因である。特にラジカルや原子を含む不均一反応はその測定が難しく、その反応機構はほとんどわかっていなかった。

大気中で起こる不均一反応ではガスの吸着・脱着・気液界面反応・液相拡散・バルク反応が同時進行しており、それぞれの寄与を見積もることが極めて重要である。研究代表者は独自の界面反応測定手法を開発し、大気中で起こる界面反応の研究を行ってきた。これまでの研究では、空気-水の気液界面においては、水分子の密度が急激に減少するために、水和構造がバルクとは異なってくるため、ある種の反応が促進される可能性が示唆されてきた[Enami et al. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **2008**, *105*, 7365, Enami et al. *J. Phys. Chem. Lett.*, **2010**, *1*, 2374, Enami et al. *J. Phys. Chem. Lett.*, **2017**, *8*, 3888, etc.]. 例えば、気液界面で起こるフェントン反応( $\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}_2$ )はバルク中に比べて  $10^3$  倍以上速く進行することがわかっている[Enami et al. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **2014**, *111*, 623]. しかし、界面反応機構とバルク反応機構の違いが何に起因しているのか、という本質的な問いについてはまだよくわかっていない。これは、バルク中で起こる反応と気液界面で起こる反応を直接比較できる実験システムが存在しなかったからである。

### 2. 研究の目的

これまで界面で起こる反応機構に関する多くの研究が行われてきたが、界面反応機構とバルク反応機構の違いが何に起因しているのか、という本質的な問いについてはまだよくわかっていないのが現状である。本提案研究では、気液界面反応とバルク反応を直接比較できる独自の実験システムを構築し、大気エアロゾルの気液界面で起こる反応を本質的に理解することを目的とする。そのために、研究代表者が独自に開発してきた気液界面反応測定手法に加えて、新たに開発するマイクロジェット交差衝突法を用いて、大気エアロゾルの環境動態の理解の鍵となる「フェントン反応系」と「テルペンのオゾン酸化系」をメインターゲットにして研究を行う。

### 3. 研究の方法

本提案研究では同一条件下で液中反応vs.気液界面反応を比較できる実験システムの構築を行った。以下、気液界面反応測定手法の原理を説明する。ネブライザーによって作られた水のマイクロジェットに、垂直方向から反応性ガスを吹き付け、気液界面で反応を起こす。その後、水のマイクロジェットに含まれる初期液滴はネブライザーガス(N<sub>2</sub>)によってフィルムと縁(へり)に変形する。フィルム状の部分には気液界面を好むイオンが多く集まり、縁の部分にはバルクを好むイオンが選択的に集まる。フィルム状部分は $\mu\text{m}$ 以下のサイズの微小液滴に、縁部分は $\mu\text{m}$ 以上の大きい液滴に分解する。微小液滴は急速に高温の乾燥窒素によって乾かされることによって、表面におけるクーロン反発を起こし、最終的に気相にイオンを放出する。この気相に放出されるイオンを四重極質量分析計で検出する。一方、縁部分に由来する比較的大きいサイズの液滴はそのままシンクに捨てられるため、そこに含まれるイオンは検出されない。これらのプロセスの結果、もともとの初期液滴の気液界面に含まれている成分が選択的に検出される。これまでの研究成果から、本手法では気液界面約1 nmで起こる不均一反応によるダイナミックな組成変化を調べることができることがわかっている[Enami and Colussi, *J. Chem. Phys.*, **2013**, 138, 184706]。

一方で、水溶液中で瞬時に起こる反応を測定するために、マイクロジェット交差衝突法を新たに開発した。従来の手法では、常温常圧下において液体と液体が衝突した瞬間に起こる反応をリアルタイムで計測することは困難であった。本手法では、マイクロジェットの衝突を利用することで、液中に生成する短寿命な化学種(ラジカルなど)の時間変化をリアルタイムで常温・大気圧条件下で追跡できる。溶液Aと溶液Bが混合して反応が起こった後、溶媒を高温の乾燥窒素で乾かすことで、気相にイオンを放出させ、質量分析計で検出した。

### 4. 研究成果

気液界面と液中で起こる大気化学反応に関して、多くの重要な知見を得た。成果を下記の業績リストに示す。成果はすべて査読付き国際誌に出版された。気液界面で起こるクリーギー中間体と-OH基を持つ化合物の反応のpH依存性を調べた(Ref 23)。その結果、バルクのpH 1-11の範囲においてクリーギー中間体の反応性に大きな影響を与えないことが初めて明らかになった。本結果は大気中のエアロゾルや雲粒の気液界面でテルペン類がオゾン酸化を受けたときに起こる反応メカニズムを明らかにした点で非常に重要である。また、気液界面で起こるカルボカチオンの反応に関する実験を行い、テルペン類由来のカルボカチオンが大気エアロゾル中のオリゴマー生成に関与していることが明らかになった(Ref 20, 22)。

マイクロジェット交差衝突法を新たに開発し、ヨウ化物イオンとオゾンの液相反応、鉄イオンと過酸化水素の液相反応、液相で起こる酸塩基反応に応用した。本測定手法のタイムスケールは10マイクロ秒以下であることを実証した。気液界面反応の測定手法で得られた結果と比較し、気液界面と液相のメカニズムを考察した。本成果は現在、論文に取りまとめているところである。また、溶液にNaClを添加することで、ヒドロペルオキシドを質量分析法で検出できる新規手法を開発し、液相反応に応用した。その結果、液中において、テルペン類由来のクリーギー中間体は水と反応し、 $\alpha$ -ヒドロキシヒドロペルオキシド( $\alpha$ -HH)を生成することが明らかになった。またクリーギー中間体はアルコールやケトンとも反応し、ヒドロペルオキシド(ROOH)とオゾニド(過酸化物の一種)をそれぞれ生成することが明らかになった。これらのテルペン類由来の過酸化物の液中での分解速度定数を世界で初めて決定することに成功した(Ref 4, 6, 7, 9,10,12,14, 17-19,21)。本成果は、多くの大気輸送モデル研究やフィールド観測研究の論文に引用されている。また、バイオマス燃焼エアロゾルの主成分であるレボグルコサンの液相での分解過程の研究を行った。本研究では、鉄イオンと過酸化水素を用いて液相にOHラジカルを発生させて、レボグ

ルコサンの酸化生成物を初めて明らかにした。上記の成果を評価され、NIES 賞(2021 年 3 月 15 日)、分子科学研究森野基金(2023 年 8 月 31 日)を受賞した。

#### 本提案研究によって得られた代表的業績リスト(すべて査読有)

1. S. Saito, N. Numadate, H. Teraoka, S. Enami, H. Kobayashi, T. Hama  
Impurity contribution to ultraviolet absorption of saturated fatty acids  
*Sci. Adv.*, **2023**, 9, eadj6438.
2. S. Enami, Y. Morino, K. Sato  
Mechanism of Fenton oxidation of levoglucosan in water  
*J. Phys. Chem. A.*, **2023**, 127, 2975-2985.
3. N. Numadate, S. Saito, Y. Nojima, T. Ishibashi, S. Enami, T. Hama  
Direct observation and quantitative measurement of OH radical desorption during the ultraviolet photolysis of liquid nonanoic acid  
*J. Phys. Chem. Lett.*, **2022**, 13, 8290-8297.
4. J. Qiu, M. Fujita, K. Tonokura, S. Enami  
Stability of terpenoid-derived secondary ozonides in aqueous organic media  
*J. Phys. Chem. A.*, **2022**, 126, 5386-5397.
5. A. J. Colussi, S. Enami  
Comment on “Liquid-Gas Interface of Iron Aqueous Solutions and Fenton Reagents”  
*J. Phys. Chem. Lett.*, **2022**, 13, 6680.
6. S. Enami  
Proton-catalyzed decomposition of multifunctionalized organic hydroperoxides derived from the reactions of Criegee intermediates with ethylene glycol in aqueous organic media  
*ACS Earth Space Chem.*, **2022**, 6, 1937-1947.
7. Y. Endo, Y. Sakamoto, Y. Kajii, S. Enami  
Decomposition of multifunctionalized  $\alpha$ -alkoxyalkyl-hydroperoxides derived from the reactions of Criegee intermediates with diols in liquid phases  
*Phys. Chem. Chem. Phys.*, **2022**, 24, 11562-11572.
8. K. Fukuda, M. Uefune, H. Fukaki, Y. Yamauchi, I. Hara-Nishimura, R. Ozawa, K. Matsui, K. Sugimoto, K. Okada, R. Imai, K. Takahashi, S. Enami, R. Wurst, J. Takabayashi  
Areal (+)-borneol modulates root morphology, auxin signalling and meristematic activity in Arabidopsis roots  
*Biol. Lett.*, **2022**, 18, 20210629 (5 pages).
9. M. Hu, K. Chen, J. Qiu, Y. H. Lin, K. Tonokura, S. Enami  
Decomposition mechanism of  $\alpha$ -alkoxyalkyl-hydroperoxides in the liquid phase: Temperature dependent kinetics and theoretical calculations  
*Environ. Sci.: Atmos.*, **2022**, 2, 241-251.
10. M. Hu, K. Tonokura, Y. Morino, K. Sato, S. Enami  
Effects of metal ions on aqueous-phase decomposition of  $\alpha$ -hydroxyalkyl-hydroperoxides derived from terpene alcohols  
*Environ. Sci. Technol.*, **2021**, 55, 12893-12901.
11. A. J. Colussi, S. Enami, S. Ishizuka

Hydronium ion acidity above and below the interface of aqueous microdroplets

*ACS Earth Space Chem.*, **2021**, 5, 2341-2346.

**12.** S. Enami

Fates of organic hydroperoxides in atmospheric condensed phases

*J. Phys. Chem. A.*, **2021**, 125, 4513-4523.

**13.** Y. Deng, S. Inomata, K. Sato, S. Ramasamy, Y. Morino, S. Enami, H. Tanimoto

Temperature and acidity dependence of secondary organic aerosol formation from  $\alpha$ -pinene ozonolysis with a compact chamber system

*Atmos. Chem. Phys.*, **2021**, 21, 1-21.

**14.** M. Hu, J. Qiu, K. Tonokura, S. Enami

Aqueous-phase fates of  $\alpha$ -alkoxyalkyl-hydroperoxides derived from the reaction of Criegee intermediates with alcohols

*Phys. Chem. Chem. Phys.*, **2021**, 23, 4605-4614.

**15.** S. Ramasamy, T. Nakayama, Y. Morino, T. Imamura, Y. Kajii, S. Enami, K. Sato

Nitrate radical, ozone and hydroxyl radical initiated aging of limonene secondary organic aerosol

*Atmos. Environ.: X*, **2021**, 9, 100102 (10 pages).

**16.** R. Wada, K. Tonokura, S. Koba, T. Imamura, K. Nakai, H. Ushiyama, K. Yamashita, Y. Matsumi, S. Enami, P. W. Seakins

Theoretical study on the enthalpies of adduct formation between alkyl iodides and Cl atoms

*Chem. Phys. Lett.*, **2021**, 762, 138140 (4 pages).

**17.** M. Hu, K. Chen, J. Qiu, Y. H. Lin, K. Tonokura, S. Enami

Temperature dependence of aqueous-phase decomposition of  $\alpha$ -hydroxyalkyl-hydroperoxides

*J. Phys. Chem. A.*, **2020**, 124, 10288-10295.

**18.** J. Qiu, K. Tonokura, S. Enami

Proton-catalyzed decomposition of  $\alpha$ -hydroxyalkyl-hydroperoxides in water

*Environ. Sci. Technol.*, **2020**, 54, 10561-10569.

**19.** J. Qiu, Z. Liang, K. Tonokura, A. J. Colussi, S. Enami

Stability of monoterpene-derived  $\alpha$ -hydroxyalkyl-hydroperoxides in aqueous organic media: Relevance to the fate of hydroperoxides in aerosol particle phases

*Environ. Sci. Technol.*, **2020**, 54, 3890-3899.

**20.** S. Ishizuka, A. Matsugi, T. Hama, S. Enami

Interfacial water mediates oligomerization pathways of monoterpene carbocations

*J. Phys. Chem. Lett.*, **2020**, 11, 67-74.

**21.** J. Qiu, S. Ishizuka, K. Tonokura, A. J. Colussi, S. Enami

Water dramatically accelerates the decomposition of  $\alpha$ -hydroxyalkyl-hydroperoxides in aerosol particles

*J. Phys. Chem. Lett.*, **2019**, 10, 5748-5755.

**22.** S. Ishizuka, T. Hama, S. Enami

Acid-catalyzed oligomerization at the air-water interface modified by competitive adsorption of surfactants

*J. Phys. Chem. C*, **2019**, 123, 21662-21669.

**23.** J. Qiu, S. Ishizuka, K. Tonokura, K. Sato, S. Inomata, S. Enami

Effects of pH on interfacial ozonolysis of  $\alpha$ -terpineol

*J. Phys. Chem. A*, **2019**, 123, 7148-7155.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計19件（うち査読付論文 19件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 10件）

1. 著者名 Enami Shinichi, Morino Yu, Sato Kei	4. 巻 127
2. 論文標題 Mechanism of Fenton Oxidation of Levoglucosan in Water	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry A	6. 最初と最後の頁 2975 ~ 2985
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpca.3c00512	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 Numadate Naoki, Saito Shota, Nojima Yuki, Ishibashi Taka-aki, Enami Shinichi, Hama Tetsuya	4. 巻 13
2. 論文標題 Direct Observation and Quantitative Measurement of OH Radical Desorption During the Ultraviolet Photolysis of Liquid Nonanoic Acid	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 8290 ~ 8297
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.2c02199	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 Qiu Junting, Fujita Michiya, Tonokura Kenichi, Enami Shinichi	4. 巻 126
2. 論文標題 Stability of Terpenoid-Derived Secondary Ozonides in Aqueous Organic Media	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry A	6. 最初と最後の頁 5386 ~ 5397
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpca.2c04077	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 Enami Shinichi	4. 巻 6
2. 論文標題 Proton-Catalyzed Decomposition of Multifunctionalized Organic Hydroperoxides Derived from the Reactions of Criegee Intermediates with Ethylene Glycol in Aqueous Organic Media	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Earth and Space Chemistry	6. 最初と最後の頁 1937 ~ 1947
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsearthspacechem.2c00142	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 Endo Yasuyuki, Sakamoto Yosuke, Kajii Yoshizumi, Enami Shinichi	4. 巻 24
2. 論文標題 Decomposition of multifunctionalized -alkoxyalkyl-hydroperoxides derived from the reactions of Criegee intermediates with diols in liquid phases	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 11562 ~ 11572
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d2cp00915c	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 江波進一	4. 巻 58
2. 論文標題 大気マルチフェーズ化学：気液界面と液中で起こるオゾン反応	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 大気環境学会誌	6. 最初と最後の頁 A53-A55
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 江波進一、石塚紳之助、羽馬哲也、猪俣敏	4. 巻 47
2. 論文標題 未来の大気化学のための室内実験	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 大気化学研究	6. 最初と最後の頁 A04
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 Enami Shinichi	4. 巻 125
2. 論文標題 Fates of Organic Hydroperoxides in Atmospheric Condensed Phases	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry A	6. 最初と最後の頁 4513 ~ 4523
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpca.1c01513	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 Colussi Agustin J., Enami Shinichi, Ishizuka Shinnosuke	4. 巻 5
2. 論文標題 Hydronium Ion Acidity Above and Below the Interface of Aqueous Microdroplets	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Earth and Space Chemistry	6. 最初と最後の頁 2341 ~ 2346
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsearthspacechem.1c00067	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 該当する

1. 著者名 Hu Mingxi, Tonokura Kenichi, Morino Yu, Sato Kei, Enami Shinichi	4. 巻 55
2. 論文標題 Effects of Metal Ions on Aqueous-Phase Decomposition of $\alpha$ -Hydroxyalkyl-Hydroperoxides Derived from Terpene Alcohols	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Environmental Science & Technology	6. 最初と最後の頁 12893 ~ 12901
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.est.1c04635	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 Hu Mingxi, Chen Kunpeng, Qiu Junting, Lin Ying-Hsuan, Tonokura Kenichi, Enami Shinichi	4. 巻 2
2. 論文標題 Decomposition mechanism of $\alpha$ -alkoxyalkyl-hydroperoxides in the liquid phase: temperature dependent kinetics and theoretical calculations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Environmental Science: Atmospheres	6. 最初と最後の頁 241 ~ 251
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d1ea00076d	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 江波進一	4. 巻 8
2. 論文標題 空気 - 水の界面で起こる化学反応	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ぶんせき	6. 最初と最後の頁 380 ~ 386
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 江波進一	4. 巻 37
2. 論文標題 テルペン由来クリーギー中間体の気液界面反応	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 エアロゾル研究	6. 最初と最後の頁 12～20
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 Qiu Junting, Ishizuka Shinnosuke, Tonokura Kenichi, Sato Kei, Inomata Satoshi, Enami Shinichi	4. 巻 123
2. 論文標題 Effects of pH on Interfacial Ozonolysis of $\alpha$ -Terpineol	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry A	6. 最初と最後の頁 7148～7155
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpca.9b05434	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 Ishizuka Shinnosuke, Hama Tetsuya, Enami Shinichi	4. 巻 123
2. 論文標題 Acid-Catalyzed Oligomerization at the Air-Water Interface Modified by Competitive Adsorption of Surfactants	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 21662～21669
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.9b07380	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 Colussi Agustin J., Enami Shinichi	4. 巻 10
2. 論文標題 Comment on "The chemical reactions in electrosprays of water do not always correspond to those at the pristine air-water interface"	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chemical Science	6. 最初と最後の頁 8253～8255
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c9sc00991d	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 Qiu Junting, Ishizuka Shinnosuke, Tonokura Kenichi, Colussi Agustin J., Enami Shinichi	4. 巻 10
2. 論文標題 Water Dramatically Accelerates the Decomposition of $\alpha$ -Hydroxyalkyl-Hydroperoxides in Aerosol Particles	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 5748 ~ 5755
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.9b01953	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 Ishizuka Shinnosuke, Matsugi Akira, Hama Tetsuya, Enami Shinichi	4. 巻 11
2. 論文標題 Interfacial Water Mediates Oligomerization Pathways of Monoterpene Carbocations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 67 ~ 74
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.9b03110	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 Qiu Junting, Liang Zhancong, Tonokura Kenichi, Colussi Agustin J., Enami Shinichi	4. 巻 54
2. 論文標題 Stability of Monoterpene-Derived $\alpha$ -Hydroxyalkyl-Hydroperoxides in Aqueous Organic Media: Relevance to the Fate of Hydroperoxides in Aerosol Particle Phases	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Environmental Science & Technology	6. 最初と最後の頁 3890 ~ 3899
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.est.9b07497	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

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 江波進一
2. 発表標題 大気マルチフェーズ化学：気液界面と液中で起こるオゾン反応
3. 学会等名 第63回大気環境学会年会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 江波進一
2. 発表標題 微小不均一性は液相反応にどのような影響を与えるか？
3. 学会等名 第16回分子科学討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 江波進一, 邱鈞霆, 藤田道也, 戸野倉賢一
2. 発表標題 テルペン由来オゾンドはエアロゾル中で分解するか？
3. 学会等名 第27回大気化学討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 江波進一
2. 発表標題 雲粒中で起こる化学反応の研究
3. 学会等名 SATテクノロジー・ショーケース2023
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Enami Shinichi
2. 発表標題 Fates of terpenoid-derived hydroperoxides in atmospheric condensed phases
3. 学会等名 6th International Workshop on Heterogeneous Kinetics Related to Atmospheric Aerosols (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 江波進一, 石塚紳之助, 羽馬哲也, 猪俣敏
2. 発表標題 未来の大気化学のための室内実験
3. 学会等名 第26回大気化学討論会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shinichi Enami
2. 発表標題 Fates of terpene alpha-hydroxyalkyl-hydroperoxides in aqueous aerosol
3. 学会等名 5th International Workshop on Heterogeneous Kinetics Related to Atmospheric Aerosols (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Ishizuka, A. Matsugi, T. Hama, S. Enami
2. 発表標題 Interface-specific reaction pathways of monoterpene carbocations
3. 学会等名 35th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 江波進一
2. 発表標題 空気 水の境界相で起こるラジカル反応のメカニズム
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第40回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 江波進一, 邱鈞霆, 戸野倉賢一
2. 発表標題 エアロゾル中のテルペン由来過酸化物の分解メカニズム
3. 学会等名 第24回大気化学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Ishizuka, A. Matsugi, T. Hama, S. Enami
2. 発表標題 Microhydration Mediates Cationic Polymerization at the Air-Water Interface
3. 学会等名 第68回高分子討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 江波進一
2. 発表標題 大気圏マルチフェーズ化学
3. 学会等名 京大大学生存圏研究所大気圏セミナー（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Ishizuka, T. Hama, S. Enami
2. 発表標題 Surfactant effects on acid-catalyzed reactions at aqueous aerosol surfaces
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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			
米国	Caltech			
米国	UC Riverside			