

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 18 日現在

機関番号：12701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23655005

研究課題名（和文）低温固相における光ナノ爆発機構の創製と解明

研究課題名（英文）study of nano-explosion reaction in solid phase at row temperature

研究代表者

關 金一（SEKI KANEKAZU）

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：30250103

研究成果の概要（和文）：塩素の光化学過程におけるラジカル機構について、アセチレン - 塩素混合系において光爆発現象を観測し、さらにブタジエン - 塩素混合系において前者を 1 ケタ以上上まわる量子収率で光ナノ爆発といえる現象を確認した。その結果、気相中と異なる反応系が低温固相中で見られることの意義を明確にできた。さらに大気化学的な側面からアセトンおよび N_2O_5 の低温固相における光化学過程において新知見が見出された。

研究成果の概要（英文）：

The photochemical chain reactions between organic compounds and halogens in solid phase at low temperature have been investigated. About the photochemical process of chlorine, the optical explosive phenomenon was observed in the acetylene chlorine mixture system. Furthermore we have found the phenomenon which can be called optical nano explosion with the huge quantum yield in butadiene-chlorine system. As a result, meaning of the difference between gas and solid phase was able to be clarified. In the photochemical process in acetone and the low-temperature solid phase of N_2O_5 , new knowledge was also found out from the atmospheric chemistry.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：化学反応動力学、光化学、大気反応化学

科研費の分科・細目：基礎化学・物理化学

キーワード：光化学、低温固相、化学反応機構、赤外分光、連鎖反応、反応制御

1. 研究開始当初の背景

低温固相での反応が重要となる実際の系は多岐にわたるが、ここでは地球大気化学における不均一反応を中心に説明をする。成層圏オゾン層の破壊に伴う太陽からの有害な紫外線の増加の懸念から、二十世紀末の地球環境問題で最も注目を集めたのは南極上空のオゾンホールである。オゾンホール発見前の諸説で、オゾン層の減少は 1 世紀の間に数パーセントと考えられていた時に、地球上の最もかけ離れた地である、南極で起こったより規模が大きく急激なオゾン層の減少という

劇的な発見によって問題がクローズアップされた。この問題の解決は南極の成層圏に見られる非常に冷たい雲の粒の表面が関わる不均一系の塩素化学反応をとりいれた仮説を提唱し、1986 年と 87 年の二度にわたり南極でオゾン層の実地観測を行って仮説の検証により行われた。これにより、オゾンホールは大気中に増加した塩素と南極の極低温環境が相まって発生すること、そして塩素供給源としてのフロン（CFCs）との因果関係が明らかになった。その結果、87 年の採択時に凍結されたフロンの生産、消費量について、

「オゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書」が90年に改定され、全廃の方向が決まり、基本的な研究から政治経済的な問題に発展した。

研究の具体的な経緯について次に詳しく見ていく。1970年代末から春先の9月から10月にかけて、南極上空で、極端なオゾン量の減少(オゾンホール)が観測されたことが80年代半ばになって公表された。このオゾン量の減少は、その広がり(南極大陸全体)と程度(70年代以前と比較すると半分近くのオゾンが破壊された)において大規模なものだった。それまでに公表されていた気相化学反応モデルによる予想をもはるかに上まわるものであった。このオゾン層の減少を説明するため1986年3月コロラド州ボルダーで開かれたオゾン問題に関する会合の折、南極上空特有のマイナス80度の極低温大気条件の下に形成される雲(極域成層圏雲)が関わる不均一系反応に基づく以下のような仮説をS・ソロモンらが提唱した(a)。南半球は北半球に比べ地球表面の構造に陸地が少なく、地表を吹く風の乱れが成層圏に伝わるものがなく、成層圏が乱れていない。そのため冬の南極上空の成層圏では渦状の気流「極渦」が生じ、外部からの熱が遮断されるので、極渦内部は気温がマイナス80℃以下になり、硝酸や水蒸気からなる極域成層圏雲が出現する。気相中ではあまり起こらない塩素と硝酸化塩素の反応が、この極域成層圏雲中の極低温微粒子表面では非常に速く起こって硝酸と塩素を生成する。次にこの塩素が、南極が春になり太陽が初めて昇り照射した光で光分解して塩素ラジカルや酸化塩素、二酸化塩素等となる。そして、これらの活性な塩素種がオゾン層を極めて高い効率で破壊するという仮説であった。この仮説はオゾン破壊に直接関わる塩素ラジカルの生成を説明できるばかりでなく、高濃度の活性な塩素種の存在をも説明できた点で画期的であった。

本研究では不均一過程で生じる塩素の反応が低温固相中での光化学により起きる影響について議論できる新たなモデルを提唱することを目的のひとつとしている。すなわち、不均一反応で生じた塩素が爆発的に固相中で反応する可能性があることがわかれば、その特徴をモデルに組み込みオゾンホールもしくは成層圏全体のオゾン層の未来予測に重要な科学的予測を与えることが可能となる。

次に低温固相における光反応の重要性が考えられる、星間空間での分子進化について説明する。電波天文学の進歩により、さまざまな分子が星間空間に存在することが明らかになり、その生成モデルについて多くの研究がなされてきた。このモデルの共通する問題点は宇宙空間のような希薄、極低温において、

如何に分子が形成されるかという点にある。従来主張されたモデルで気相における化学反応を取り上げたものでは、イオン分子反応によるものが挙げられる。その反応速度が極めて大きいことおよび、温度依存性が小さいことがその根拠となっている。別の可能性として、最近ではCNラジカルやC2Hラジカル等のラジカル中性反応にも注目が集まっており、いろいろな分子との反応速度が低温等で測定されている(b,c)。星間塵等の表面化学反応もその候補には挙げられているが、実際の反応速度論的な検証が困難であるため、気相での反応に比べ実証データが少ない。

2. 研究の目的

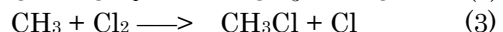
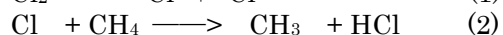
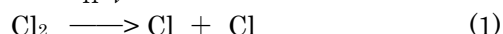
光ナノ爆発機構の創製と解明—極低温相におけるラジカル連鎖と反応選択性

極低温化での化学反応は通常の反応理論からすると進行が遅く、トンネル効果の検証を除き研究対象となっていないのが現状である。しかし、最近レーザーを用いた光反応過程において、極低温下(77~10K)での反応速度が、常温に比べ著しく速く(1000倍以上)かつ高度の反応選択性が見出された。その現象機構の創製および現実の系、特に地球大気における不均一反応における光化学素過程、宇宙科学における分子雲形成の機構等におけるその重要性を提唱するのが研究目的の主眼である。

基本的な光化学過程において、従来の光反応過程と本研究が創製するナノ爆発光化学反応を比較することにより、研究目的の詳細を以下説明する。

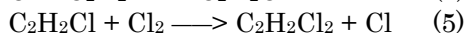
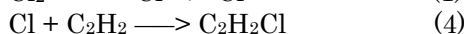
ハロゲン分子と有機化合物の光反応は光によりラジカルを形成し、その後の連鎖反応系により成立する光化学反応の典型例である。以下塩素分子とメタンの反応過程を化学式で示す。

$h\nu$



すなわち(1)で光解離したCl原子が反応中心となり、ラジカル連鎖反応により、連鎖中心を増大させていく反応で、常温、可視光存在下で速やかに反応は進行していく。我々の事前研究では、この系を低温固相下(77K)でレーザー光照射を行っても反応は進行しないことが判明している。このことは温度低下に伴い、(2)の反応が進行しないために、光解離により生じた塩素原子同士が比較的近傍にとどまるため、再結合により塩素分子に戻るにより説明される。以上の塩素一飽和炭化水素の系は従来の一般的な反応の過程として理解される。一方、上記のメタンの代わりにアセチレンのような不飽和炭化水素を用いて実験したところ、爆発とも言える劇的な変化が見られている。アセチレンと塩素

の系は以下の素反応過程から進行すると考えられる。



光解離で生じた塩素原子が飽和炭化水素では水素原子の引拔をするのに対し、不飽和炭化水素の系では多重結合への挿入後、塩素付加体のラジカルが生じ(4)、そのラジカルが塩素分子との反応を起こす連鎖反応系が起きる(5)ことが、気相における常温の光化学反応では検証されている。この反応は(4)の過程が3体反応で、気相では比較的ゆっくりと進むため生成物の量子収率は常温では2桁程度である。それに対し、我々の研究室で行った77Kの低温固相の実験では少なくとも 10^4 以上の生成物の量子収率が観測された。この量子収率の上昇は低温にすると反応速度は減少するという基本的な反応素過程の概念からは説明できないものである。さらにこの低温固相の系では生成物の著しい選択性が観測されていることもこの反応の特異性を示している。具体的には観測された生成物のジクロロエチレン($\text{C}_2\text{H}_2\text{Cl}_2$)は気相の系ではシス体とトランス体の異性体がほぼ等量観測されたのに対し、低温固相の系では、トランス体のみが生成していることが判明した。このことも低温固相下では気相とは異なった選択性を有する新たな機構の反応が進行していることを裏付けている。

選択性を持った反応が低温固相のみで進行しており、その反応速度が常温気相に比べ著しく上昇していることは極めて興味深い事実である。反応速度が低温にすると上昇するという反応過程は通常、いくつかの素反応過程の組み合わせの中で、中間体の生成に伴い観測されることは周知である。しかしながら、今回のような速度定数の桁が異なるような系、すなわち爆発とも呼ぶべき例は稀有であり、さらには低温固相における光化学過程の現象としては極めて異例であり、次に紹介する大気系へのインパクトを考えると、この研究は極めて大きな意味をもっている。

3. 研究の方法

本研究は低温固体中の分子において、光励起により始まるラジカル反応が気相中でのラジカル分子反応とは異なる反応速度で反応が進行することが予想されることを前提に企画されている。特に大気微量成分のような極希薄状態下での反応は固相に濃縮される効果があるため、気相反応に比べて劇的に反応速度が大きくなる可能性を秘めている。研究はまず現在光ナノ爆発の現象が観測されている典型的な有機化合物での研究を進める。その結果を踏まえて、大気科学、特に成

層圏で重要となっている、塩素系の不均一系にこの手法を適用する。具体的にはオゾン層破壊で重要な役割を担っているC10のリザーバー種であるC1ONO₂の水表面での反応、NO_xサイクルのやはりリザーバー種であるN₂O₅の加水分解機構の解明に光化学過程が果たす役割について検討を行う。具体的な方法は基本的な固相における生成物の定量測定(これについてはノウハウの蓄積が必要で、現在までに実績を挙げている)と低温マトリックス中における光化学過程のその場観測で、両者の実験結果を対応させることにより、反応生成物の生成機構がより鮮明になり、気相中と異なる反応系が低温固相中で見られることの意義を明確に出来ると考えている。

4. 研究成果

研究成果として

- 1) アセチレン塩素系ナノ爆発の解明
- 2) ブタジエン塩素系ナノ爆発の解明
- 3) C1ONO₂の低温固相光化学素過程

について報告がなされているが、ここでは1)を中心に説明する。

これまでの結果から、 $\text{C}_2\text{H}_2 + \text{Cl}_2$ 混合系の光化学について次のことがわかった。

まず常温気相と低温固相(77K)の比較では低温固相において収率が4000倍増加し、trans-DCEのみが生成する。これは間接測定による実験結果である。次に、 $T = 80 \sim 90\text{K}$ 固相では $\Phi_{\text{C}_2\text{H}_2} = 10^3$ 以上の量子収率を示し、trans-DCEのみが生成する。 $T = 10 \sim 20\text{K}$ 固相では $\Phi_{\text{C}_2\text{H}_2} = 10 \sim 10^2$ 以上の値を示し、ほぼtrans-DCE : cis-DCE = 7 : 3の生成比が成立する。これらは本実験における直接測定の結果である。

直接測定における $T = 80 \sim 90\text{K}$ 固相の実験結果と、間接測定における低温固相(77K)の結果は、生成物の選択性などの点で定性的に一致しており、同じ反応機構で反応が進んでいると考えられる。気相と固相における反応の違いに加えて、固相中でも温度により反応性に違いが生じることがわかった。

常温気相、 $T = 80 \sim 90\text{K}$ 固相、 $T = 10 \sim 20\text{K}$ のそれぞれの条件における反応機構を予測するために、次の2点について考察した。

- ・中間体($\text{C}_2\text{H}_2\text{Cl}$ ラジカル)の安定構造と安定化エネルギー
- ・固相における $\text{C}_2\text{H}_2 - \text{Cl}_2$ 錯体の形成とその安定構造

以下に考察の詳細を述べる。

(1) $\text{C}_2\text{H}_2\text{Cl}$ ラジカルの安定構造¹⁾

安定構造と安定化エネルギー

C_2H_2 と Cl_2 の光化学過程における議論を以下に行う。

これらの反応が低温固相においても同様に進行するならば、生成する $\text{C}_2\text{H}_2\text{Cl}$ ラジカルは

反応中間体となり、その構造および反応性は最終生成物の構造決定に非常に重要である。Gaussian03 を用いた ab initio 計算により、 C_2H_2Cl ラジカルの安定構造および振動数の予測を行った。

構造最適化計算によりその安定構造を予測したところ、図 1 (a)、(c) に示す 2 つの構造が予測された。Cl 原子に対して、非共有電子対が対角線側にある (a) の構造を trans 型、(c) の構造を cis 型とする。いずれも平面構造であり、2 つの構造間には (b) の遷移構造が存在することが計算から予測された。これらのエネルギー図を図 2 に示す。また trans 型 \leftrightarrow cis 型の構造変化に対する障壁を考えるため C-C-H 結合角および H-C-C-Cl 二面角の変化に対するポテンシャルエネルギー曲線を計算した。

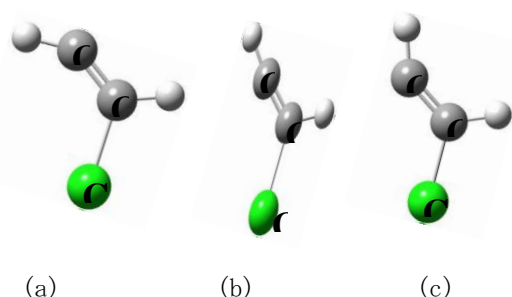


図 1 Ab initio 計算により予測された C_2H_2Cl ラジカルの安定構造

(a) trans 型, (b) 遷移状態の構造, (c) cis 型

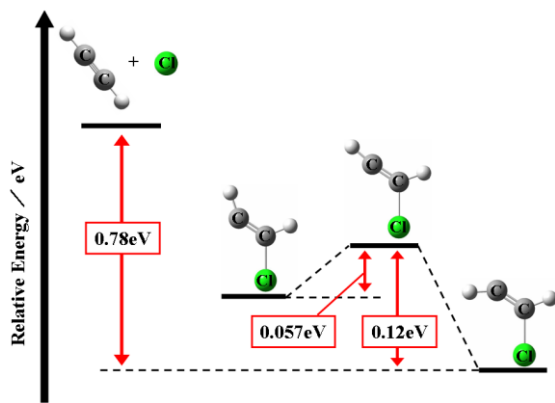


図 2 Ab initio 計算による C_2H_2Cl ラジカルのエネルギー図
B31yp6-311G+dp

不対電子の位置に Cl 原子がつけばそのまま trans 型から trans-DCE が、cis 型からは cis-DCE が生成するため、中間体生成の過程が起きる際のラジカルの構造に依存して trans-DCE、cis-DCE の生成が決定すると考えられる。またポテンシャルエネルギー曲線の計算による反応経路の予測からも同様の関係が確認されている。

計算結果では trans 型よりも cis 型のほうが約 0.06eV 安定であった。また遷移構造とのエネルギー差すなわち構造変化に対するエ

ネルギー障壁は、trans 型 \rightarrow cis 型の変化が 0.11eV であり cis 型 \rightarrow trans 型の変化が 0.05eV であった。これらのエネルギー差は非常に小さな値であり、常温気相状態においては分子の持つ熱エネルギーにより容易に超える障壁である。しかし、分子の熱分布は温度が下がるにつれてボルツマン分布に従いより低い分布となっていく。また固相では周囲の分子の熱欲により振動緩和の過程が早いため、分子が熱的な平衡状態に達していると考えられる。これらのことから $T=80\sim 90K$ および $T=10\sim 20K$ といった低温固相状態においては構造変化間のエネルギー障壁が重要となる可能性がある。そこで各温度においてボルツマン分布から占有率を計算し、その分子数比について考察した。

(1) $T=10K$ の場合

cis 型 \rightarrow trans 型の変化に対する障壁は 0.057eV である。よって $T=10K$ では 5.1×10^{-29} となり、障壁を越えることのできる分子数の比は cis 型の C_2H_2Cl ラジカルの基底状態にある分子数に対して 5.1×10^{29} 分の 1 ということになる。

また、trans 型 \rightarrow cis 型の変化に対する障壁は 0.11eV というより大きい値となるので 2.7×10^{-50} となり $T=10K$ 固相では熱エネルギーによる構造変化が起こりにくいことがわかる。

(2) $T=80K$ の場合

同様の計算より、 $T=80K$ において構造変化しうる C_2H_2Cl 分子数の比は

cis 型 \rightarrow trans 型の変化では、 $N_i/N_j=1/2.9 \times 10^4$

trans 型 \rightarrow cis 型の変化では、 $N_i/N_j=1/3.5 \times 10^8$

(3) $T=300K$ の場合

cis 型 \rightarrow trans 型の変化では、 $N_i/N_j=1/11$

trans 型 \rightarrow cis 型の変化では、 $N_i/N_j=1/100$

となる。

以上の計算より、 $T=10K$ および $80K$ 固相における C_2H_2Cl ラジカルの熱エネルギーによる構造変化は、 $T=300K$ すなわち常温気相の状態と比べはるかに起きにくいことがわかる。常温気相においては熱エネルギーの規模に対してはるかに低い高さの障壁しか存在しないため、生成した C_2H_2Cl ラジカルは容易に構造変化し、trans 型 \leftrightarrow cis 型の平衡状態となった状態から、 Cl_2 と反応して DCE を生成する。また気相では固相のように速い振動緩和の過程は起きないため、最初の C_2H_2+Cl 原系の過剰エネルギーという観点からも、構造変化は容易であり同様のことが言える。これが気相において、trans-DCE および cis-DCE が生

成する理由であると考えられる。しかし、 $T=10\sim 20\text{K}$ および $T=80\sim 90\text{K}$ 固相では障壁を越えることができずに構造変化が起きないのであれば、 $T=10\sim 20\text{K}$ と $T=80\sim 90\text{K}$ では同じ生成物が得られるはずである。 $T=80\sim 90\text{K}$ 固相と $T=10\sim 20\text{K}$ 固相における反応の違いについては、 $\text{C}_2\text{H}_2\text{-Cl}_2$ 錯体の形成を考えることで考察することができる。

$T=80\sim 90\text{K}$ で吹きつけた固相 IR スペクトルにおいて CH 変角振動の吸収が 2 つに分裂することが観測された。これは、固相中で C_2H_2 と Cl_2 が錯体を形成することを示している。 C_2H_2 と Cl_2 の錯体構造としては、2 つの安定構造が存在することが報告されている。これらの錯体を形成することにより、 C_2H_2 分子単体では縮退している CH 変角振動について面内方向および面外方向への振動エネルギーに差が生じるため分裂が起きる。

$T=10\sim 20\text{K}$ で吹きつけた固相では、凝縮時がより低温であるために、個々の分子は 1:1 の $\text{C}_2\text{H}_2\text{-Cl}_2$ 錯体が様々な構造をとりながらランダムな配向で存在していると考えられる。それらの錯体が近接しあって相互作用した結果、CH 変角は 1 つのブロードな吸収を示し、CC 伸縮の赤外活性化および CH 伸縮の半値幅の広がりといった変化がみられる。

$T=80\sim 90\text{K}$ で吹きつけた固相では、凝縮の際の自由度の増加により分子は固相中で $\text{C}_2\text{H}_2\text{-Cl}_2$ 錯体として安定構造をとり、分子同士は少なくとも $T=10\sim 20\text{K}$ 固相よりも配向性の高い状態で存在し、 C_2H_2 と Cl_2 が一次元方向へ伸びる分子鎖を形成する。その結果 CC 伸縮は赤外不活性化を起こし、CH 伸縮はシャープな吸収帯へと変形する。

さらなる変化として CH 変角の吸収が 2 つに分裂することは、やはり C_2H_2 と Cl_2 が錯体を形成していることを示している。

CH 変角の吸収帯の分裂

$\text{C}_2\text{H}_2\text{-Cl}_2$ 錯体の各構造、および C_2H_2 について振動数の計算値と実験値との比較を行った。 $\text{C}_2\text{H}_2\text{-Cl}_2$ 錯体はどちらの構造でも CH 変角の分裂が起きるが、分裂の幅が実験値と比べ小さく、また $T=80\sim 90\text{K}$ 固相では赤外不活性となっている CC 伸縮の相対強度が 0.03、0.01 と弱いながらも赤外活性となっている。

この点について考察することで固相中の分子の状態をさらに詳しく推測した。

C_2H_2 と Cl_2 が錯体を形成した上で、錯体同士もまた規則正しい配列で存在し、一次元方向へ伸びる分子鎖を形成しているとすれば、直線状態となる。このとき $\text{C}_2\text{H}_2\text{-Cl}_2$ 分子自体は両側から 2 つの Cl_2 分子に配位された状態になるため、相互作用としては 1:2 の錯体に近くなると考えられる。このような 1:2 の錯体構造における安定構造と振動数を計算

により求めたところ、分裂幅がより大きな値を示す振動数が得られ、CC 伸縮は赤外不活性であるという結果が得られた。これらの結果から、 $T=80\sim 90\text{K}$ 固相では錯体同士が分子の配列がそろった一次元鎖の状態にあるか、またはそれに近い構造をしていると考えられる。

低温固相における分子の状態が上で述べたような状態になっているならば、 $T=10\sim 20\text{K}$ 固相と $T=80\sim 90\text{K}$ 固相における反応性の違いは、次のように説明することができる。 $T=10\sim 20\text{K}$ では低温における急激な凝縮によって、個々の分子は 1:1 の $\text{C}_2\text{H}_2\text{-Cl}_2$ 錯体が様々な構造をとりながら、ランダムな配向で存在していると考えられる。そのため連鎖反応は効率よく進まず Cl 原子同士の再結合過程あるいは $\text{C}_2\text{H}_2\text{Cl}+\text{Cl}\rightarrow\text{C}_2\text{H}_2+\text{Cl}_2$ の過程により反応が終了してしまい、収率が低くなる。一方 $T=80\sim 90\text{K}$ 固相では C_2H_2 と Cl_2 が一次元鎖を形成することにより連鎖反応が効率よく進み、また錯体同士の配向性に起因する構造的な選択性が生じ、生成物が trans-DCE のみになると考えられる。

$\text{C}_2\text{H}_2+\text{Cl}_2$ の光化学反応は常温気相と低温固相 (77K) の違いで、収率の増加および生成物の選択性が劇的に変化する。この反応についてクライオスタットを用いて $T=10\sim 20\text{K}$ および $T=80\sim 90\text{K}$ 固相における反応過程を直接観測した。

$T=80\sim 90\text{K}$ 固相における反応は、 $\Phi\text{C}_2\text{H}_2\geq 10^3$ 以上という大きな量子収率を示す。 $T=10\sim 20\text{K}$ における値は $\Phi\text{C}_2\text{H}_2\approx 10\sim 10^2$ であり、 $T=10\sim 20\text{K}$ と $T=80\sim 90\text{K}$ 固相での反応ではその収率に約 100 倍の違いがある。また、 $T=10\sim 20\text{K}$ 固相における反応では、trans-DCE と cis-DCE の両方が生成する。(trans-DCE : cis-DCE $\approx 7 : 3$) 一方、 $T=80\sim 90\text{K}$ 固相における反応では trans-DCE のみが生成し、反応の一次過程では cis-DCE はまったく生成しない。

$T=80\sim 90\text{K}$ 固相においては、 $\text{C}_2\text{H}_2\text{-Cl}_2$ 錯体が形成しており分子が一次元鎖を形成して規則正しい配列で存在している。そのため、連鎖反応が効率的に進み量子収率が爆発的に増加し、その分子配置に起因して trans-DCE が生成する反応経路が支配的となる。このメカニズムが、固相における収率の増加および極端な生成物選択性をもたらしていると考えられる。一方 $T=10\sim 20\text{K}$ 固相では C_2H_2 と Cl_2 は錯体同士がランダムな配向で存在し、そのため連鎖反応が効率的に進まずに生成物として cis-DCE も生成するような反応経路が開けてくる。

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 3 件)

- (1) Takanori Kobayashi, Yuji Kohne, Toshiyuki Takayanagi, Kanekazu Seki, Kazuyoshi Ueda, Rare gas bond property of Rg-Be₂O₂ and Rg-Be₂O₂-Rg (Rg=He, Ne, Ar, Kr and Xe) as a comparison with Rg-BeO, Computational and Theoretical Chemistry, 991, 2012, 48-55. 査読有
DOI:10.1016/J.comptc.2010.03.020
- (2) Kanekazu Seki, Takanori Kobayashi, Kazukiyo Ebata, Laser photolysis of trans-dichloroethylene at 193 nm: Quantum yields of photoproducts, Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 219, 2011, 200-203. 査読有
DOI:101016/j.jphotochem.2011.02.010
- (3) Kobayashi Takanori, Kanekazu Seki, Tomokazu Tanaka, Tashiyuki Takayanagi, Electronic structure computational study of H and Mu addition to C=S double bonds, Computational and Theoretical Chemistry, 963, 2011, 256-262. 査読有
DOI:10.1016/j.comptc.2010.11.022

[学会発表] (計 7 件)

- ① 上門瞳、横手 祐一、關 金一、「ハロゲン化エチレンの光化学」、第 6 回分子科学討論会、2012、9 月、東大
- ② 島沢翔太、瀬戸亮、榊原和久、關金一、「大気中微量ラジカル種の濃度測定を目的とした捕集剤を用いた研究」、光化学討論会、2012、9 月、東工大
- ③ K. Seki, O. Masashi, “Study for Nano Explosion Processes in Solid State” XXIV IUPAC Symposium on Photochemistry, 2012, 7 月 ポルトガル, コインブラ
- ④ K. Seki, O. Masashi, Z. Rui, “Study for Nano Explosion Processes in Solid Phase under 110K : Photochemical Reactions between Butadiene and Chlorine”, 28th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, 2012、6 月、九大
- ⑤ 横手裕一、關金一、「Ar マトリックス中におけるジクロロエチレン類の光化学」、日本化学会第 92 春季年会、2012、3 月、慶応大学(日吉)
- ⑥ 小林孝徳、關金一、高柳敏之、「高度量子科学計算による菱形 Be₂O₂ と希ガスの結合」、回分子科学討論会、2011、9 月、北大
- ⑦ 瀬戸亮、島沢翔太、榊原和久、關金一

「気相における短寿命活性ラジカル種の安定ラジカル化学種を用いた捕獲と定量」、有機化学討論会、2011、9 月、筑波大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

關 金一 (SEKI KANEKAZU)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：30250103