

令和元年5月23日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (特設分野研究)

研究期間：2015～2018

課題番号：15KT0062

研究課題名(和文) 量子状態制御した分子ビームを用いた表面化学反応遷移状態へのアプローチ

研究課題名(英文) Approach to surface chemical transition state using quantum state controlled molecular beam

研究代表者

岡田 美智雄 (Okada, Michio)

大阪大学・放射線科学基盤機構・教授

研究者番号：30281116

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：表面化学反応の遷移状態を追跡するため、分子線を用いた実験技術を開発しながら基礎研究を進めた。具体的には、銅や銅合金表面での酸素分子、エチレン分子の反応を追跡し、超熱エネルギー領域の分子の反応過程について明らかにした。また、量子状態制御した酸素分子線を用いて酸化反応の立体化学ならびに合金の効果明らかにした。さらに、分子-分子反応解明のための超高真空対応型配向分子線装置の開発調整を行い、さらに将来展開を目指して高速レーザー分光法の開発も進めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

表面に飛来する分子と表面の相互作用が表面反応に大きく関わっている。そのため、分子線により分子の状態制御を行った測定により得られる表面反応ダイナミクスの詳細な情報は、反応素過程を理解する上で非常に重要であり学術的に大きな意味を持つ。これによりエネルギーや環境問題において重要な触媒反応を理解でき、反応の高効率化、新規触媒創出による反応選択性の向上、環境にやさしいプロセスへの変更が可能となる点で社会的意義も大きい。

研究成果の概要(英文)：In order to track down the transition state of surface chemical reactions, we carried out basic research and developed new/novel experimental techniques with molecular beams. Specifically, we traced the reaction of oxygen and ethylene molecules on copper and copper alloy surfaces, clarifying the reaction process in the hyper-thermal region. In addition, we clarified the underlying effects of stereochemistry and alloying on the oxidation reaction, using quantum state-resolved/controlled molecular beams of oxygen. We also developed and constructed an ultra-high vacuum compatible oriented molecular beam device for elucidating molecule-molecule reactions, and further advanced high-speed laser spectroscopy for future development.

研究分野：表面化学

キーワード：表面反応 表面界面物性 分子線 量子状態制御

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19(共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究課題で用いる量子状態を制御した超音速分子ビーム（配向分子ビーム）装置を開発し、表面化学反応素過程の完全解明を目指して研究を進めていた。この配向分子ビーム法では、電場中の分子のシュタルク効果を用いて、単一の回転量子状態の分子を選別し、表面に衝突する際の分子の向きを制御しており、世界的に見てもユニークな研究手法となっている。その結果、メチルシランの生成反応素過程として産業界でも重要な、塩化メチル分子 (CH_3Cl) がシリコン (Si) 表面で解離吸着する反応において、Cl 端から表面に入射する方が CH_3 端から入射する場合に比べて、解離吸着反応性が高いという結果を世界で初めて実験的に確認した (Phys. Rev. Lett. 95, 176103 (2005))。さらに、入射する CH_3Cl の配向制御によって、解離吸着をするか物理吸着をするかの動的反応経路も選択できる可能性を示した (J. Am. Chem. Soc. 129, 10052 (2007))。これにより、反応経路途中の情報も、配向分子ビームを用いることにより明らかにすることが可能であることがわかった。さらに、表面反応素過程の解明には、気相生成物だけでなく表面上に生成する反応生成物も分析する必要があると考え、配向分子ビームと X 線光電子分光を組み合わせた装置を作製した。その装置を用いて、Si の絶縁膜生成において重要な酸化反応において、Si 表面に入射する一酸化窒素分子 (NO) 分子の向きについて、N 端から入射する方が O 端から入射するよりも、反応効率が高いという結果を得ることに成功した (Phys. Rev. Lett. 100, 256104 (2008))。この結果から、この手法により反応経路途中の前駆状態も解明可能であることがわかった。以上の結果から、表面に衝突する際の分子の配向を制御することにより、反応経路を選択し、反応生成物を選択制御できる可能性を示した。

このように開発してきたこれらの量子分子ビームの手法を改良しながら駆使して、表面化学反応素過程に出現する遷移状態の情報を得て制御したいと考えて新しく研究提案を行った。特に自動車の排ガス処理において重要な触媒過程の全容を量子レベルで詳細に理解し、新しい触媒能の探索へと展開できるようにしたいと考えた。具体的には、白金 (Pt) やロジウム (Rh) 表面上での NO 分子と一酸化炭素 (CO) 分子の分子-分子反応を取り上げてその素過程を解明する事を目標として装置開発を進めながら研究を遂行する計画をした。

国外の表面研究においては、配向分子ビームは、主として表面散乱過程のダイナミクスの研究に用いられてきた。1999 年以降は、研究予算の確保の難しさから、ほとんどの研究グループが撤退していった。そのような世界的な状況の中で、我々は配向分子ビームを表面反応の研究に用いることを着想し、装置作製を開始し、研究開始当初に至っている。また、レーザーを用いた配向分子ビームの生成と研究もドイツのマックスプランク研究所で行われているが、主として散乱過程の研究であり、反応の研究には原理的に適用できない。入射分子の配向まで制御し、反応素過程解明とその新展開に関して、原子レベルでの研究手法を用いてアプローチした例は、それまで我々以外にない状況であった。

2. 研究の目的

- (1) 金属表面上での酸化反応を始めとする各種化学反応における入射分子の並進エネルギー依存性解明
数 eV の分子並進エネルギーまで達成できる超熱分子ビーム装置を用いて、酸化反応を始めとする各種反応における入射分子の並進エネルギー依存性を明らかにし、相互作用ポテンシャル（反応ポテンシャル）を明らかにする。ここでは分子配向に関しては平均化した情報が得られる。これを理論計算と比較して、入射エネルギーに依存した相互作用ポテンシャルを遷移状態の特徴に着目して明らかにする。酸化反応や塩化メチル分子の反応から始めて最終的にはモデル表面としては Pt (111) ならびに Rh (111) 表面での $\text{NO}+\text{CO}$ 反応過程について明らかにする。
- (2) 金属表面上での酸化反応を始めとする各種化学反応における入射分子の分子配向および配列依存性解明
上述項目 1 で研究対象とした各種表面反応系について、配向および配列分子ビーム法を用いて表面化学反応立体ダイナミクスを解明する。これにより反応過程における入射分子配向の役割を量子レベルで理解することが可能となり、項目 1 での研究結果と併せて、反応のポテンシャル曲線を六次的に詳細に描くことが可能となる。特に、反応効率や反応選択性の分子配向依存性がどのように変化するかを追跡する。さらに、反応生成物のエネルギー状態を測定し、実験的に遷移状態に迫る。これらの測定と併行して、理論計算を進めて遷移状態の理解を試みる。
- (3) 遷移状態解明のためのレーザー分光法の開発
反応途中にある状態を検出して、遷移状態を明らかにするための高速レーザー分光を開発する。

3. 研究の方法

- (1) 真空中への断熱膨張により超音速分子ビームを発生させるノズルを 1400 K 程度まで加熱することにより、並進エネルギーが 2 eV 程度までの分子ビームを発生することができる。様々の並進エネルギーで分子ビームを入射し、放射光を用いた高分解能 X 線光電子分光法

(XPS)により表面生成物を調査する。また、新規に開発を行っている超音速分子ビーム装置を完成させ、それを用いて赤外分光法、付着確率の測定法、散乱法、気相反応生成物測定法により反応性の評価を行う。ビーム照射中に表面上で起こる反応については赤外分光法を用いて評価する。

- (2) これまで開発してきている超高真空対応配向分子ビーム装置を用いて回転量子状態選別した超音速分子ビームを発生し、表面に衝突する分子の向きを制御して反応過程の詳細を調べる。六極電極により発生する不均一電場によるシュタルク効果を利用して単一回転状態の分子を選別する方法で分子の向きを制御するが、本研究では、広範囲の並進エネルギーで量子状態選別可能とするため、六極電極を改良して反応について調べる。特に赤外分光法を併用して調べる。さらに、酸化反応の立体効果についてはNIMSのグループと協力して、六極磁場を用いて酸素分子の量子状態選別を行い、スピン回転状態を制御して表面反応を調べる。
- (3) 新しい課題として、可視領域 (520 -760nm) の超短パルスレーザー (パルス幅 <10fs) を使用して、表面の非線形分光装置の開発を行う。表面の非線形分光に由来する信号はレーザー強度に依存するため、レーザー強度が高いほうが望ましい。非共軸パラメトリック増幅における pump 光の波面傾斜による光パラメトリック過程における位相整合条件の改善を行い、従来よりも高いレーザー強度を得ることを目指す。

4. 研究成果

- (1) Fig. 1 に清浄な $\text{Cu}_3\text{Au}(111)$ 表面について、光電子検出角 0° および 70° で測定した Au-4f XPS スペクトルをそれぞれ示している。Au-4f_{7/2} および Au-4f_{5/2} ピークは、それぞれバルクの Au 原子に由来する成分 B と表面の Au 原子に由来する成分 S の 2 つのピーク成分に分離することができる。また、この成分 B と成分 S の強度の比は、検出角度に大きく依存する。この検出角依存性から、検出電子の平均自由行程を考慮して、原子層毎の Au 原子含有比率を求めることができる。このようなスペクトル解析により求めた Au 原子の層別組成分布を Table 1 に示す。

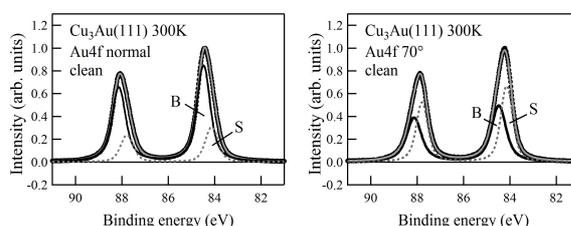


Fig. 1 Detection angle dependence of Au-4f XPS spectra on clean $\text{Cu}_3\text{Au}(111)$; surface-normal (left) and 70° oblique (right) detections. The XPS spectra can be clearly separated into a bulk (B) component

Table 1 The layer profile of Au atomic fraction (%) for $\text{Cu}_3\text{Au}(111)$, $\text{CuAu}(111)$, and $\text{Au}_3\text{Cu}(111)$

	1 st layer	2 nd layer	3 rd layer
$\text{Cu}_3\text{Au}(111)$	51	32	bulk (25)
$\text{CuAu}(111)$	94	72	bulk (50)
$\text{Au}_3\text{Cu}(111)$	100	100	bulk (75)

清浄な $\text{Cu}_3\text{Au}(111)$ 表面では、第 1、2 層目の Au 原子の原子数組成はそれぞれ 51% および 32% であった。バルクの Au 原子比率の増加とともに表面の Au の原子比率は増加して、 $\text{Au}_3\text{Cu}(111)$ 表面では第 1、2 層目ともに 100% の Au 原子比率となった。これらのことから、表面近傍層の Au 原子比率はバルクの Au 原子比率により制御できることがわかった。また、どの合金でも清浄表面では Au 原子が表面に析出していることが分かった。ここで実験的に求めた原子層毎の Au 原子数組成は、第一原理計算によっても定量的に非常によく再現されている。

- (2) Fig. 2 は $\text{Cu}(111)$ 、 $\text{Cu}_3\text{Au}(111)$ 、 $\text{CuAu}(111)$ ならびに $\text{Au}_3\text{Cu}(111)$ 表面における酸素被覆率の酸素分子線照射量依存性を示している。前節 (1) で述べたように、どの合金も清浄表面で

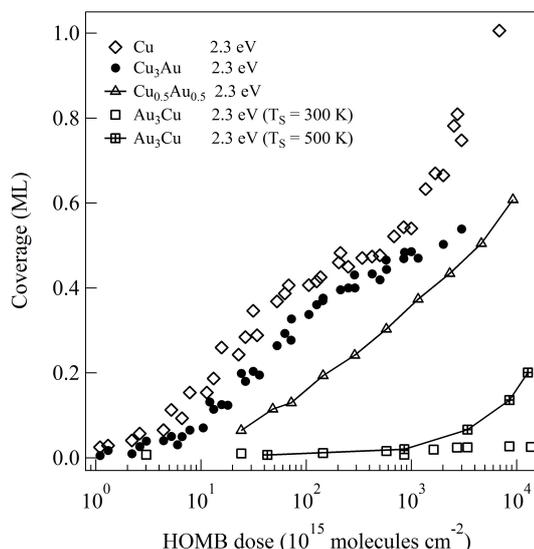


Fig. 2 Oxygen (O) uptake curves for 2.3 eV hyperthermal O_2 molecular beam incident on $\text{Cu}(111)$, $\text{Cu}_3\text{Au}(111)$, $\text{CuAu}(111)$ and $\text{Au}_3\text{Cu}(111)$.

は Au 原子が表面に析出しているため、純粋な Cu よりも反応性が低下することが期待されるが、その通りになっており、バルクの Au 原子比率の高いほど酸化反応性は低い。特に $\text{Au}_3\text{Cu}(111)$ では、第 1, 2 層が 100% Au であることから、超熱エネルギー領域の酸素分子に対してもほとんど反応することなく、表面で酸化に対する保護膜機能が働いている。一方、 $\text{Cu}_3\text{Au}(111)$ 表面では Au 原子層比がやや低く酸化反応が進むが、反応性は Cu(111) 表面と比較して大きく低下している。特に酸化物が生成する被覆率 0.5 ML 以上では、あまり酸化が進んでいないことがわかる。0.5 ML 付近で清浄表面と同様の方法で Au 原子層比率を求めると、第 1~3 層の Au 原子の原子数組成はそれぞれ 0、47 および 45% であった。この結果から、最表面には Cu 酸化層が析出し、第 2 層目以降に Au 組成比の高い原子層が形成されていることがわかった。この表面下の Au 原子層は、酸素原子のバルクへの拡散および銅原子の表面への拡散を妨げることで、酸化に対する保護膜として働くため Cu 単体のようにバルク内部まで酸化されない。合金化により反応の遷移状態が制御できることがわかった。

上述したように $\text{Au}_3\text{Cu}(111)$ では強力な保護膜のため、室温では、ほとんど酸化が進まないが、500 K 程度に加熱すると表面濃度の揺動のため、わずかに析出した Cu 原子が反応核となり酸化反応が進み、保護膜機能が破れてしまうことがわかった。

- (3) 固体表面における酸素分子の反応には分子の並進エネルギーが大きく影響する。特に、室温において長時間かけて進行するような酸化物の生成過程には、比較的大きな並進エネルギーを持った分子による反応が寄与すると考えられる。本研究課題においては並進エネルギーの大きな分子線を用いて、表面酸化物生成過程を系統的かつ詳細に調査した。また、試料として Cu 合金を用い、Cu 単体の結果と比較することで合金化が酸化物生成に与える影響を明らかにした。合金試料は $\text{Cu}_3\text{Au}(111)$, $\text{Cu}_3\text{Pd}(111)$, $\text{Cu}_3\text{Pt}(111)$ を用いた。それぞれの合金試料における XPS スペクトルから、いずれの合金においても Cu のみが選択的に酸化されることを確認した。Table 2 にそれぞれの合金試料表面に生成した Cu 酸化物を、表面温度 300 K および 500 K についてまとめている。この結果は、合金成分および表面温度により異なる酸化物が生じることを示している。特に表面温度 300 K において、Cu(111) 表面では Cu_2O が生成する一方、 $\text{Cu}_3\text{Pd}(111)$, $\text{Cu}_3\text{Pt}(111)$ 合金表面では CuO が生じていることから、合金に含まれる Pd, Pt が Cu の酸化を促進させることが示唆される。ここで、金属単体での仕事関数を比較すると Cu(111) < Pd(111) < Pt(111) であることから、表面生成酸化物—バルク界面における電荷移動は Cu(111) よりも $\text{Cu}_3\text{Pd}(111)$, $\text{Cu}_3\text{Pt}(111)$ の方が強く起こる。そのため、より酸化物が正に帯電しやすい $\text{Cu}_3\text{Pd}(111)$, $\text{Cu}_3\text{Pt}(111)$ 合金においては CuO が生成されると考えられる。これも反応の遷移状態が合金化の影響を受けた結果と考える。

Table 2 Cu 合金表面における生成物

	Cu_3Au	Cu_3Pd	Cu_3Pt	Cu
300 K	Only chemisorbed O	CuO	CuO	Cu_2O
500 K	Cu_2O	Cu_2O	CuO	Cu_2O

- (4) 炭化水素分子の金属表面における脱水素化反応は、グラフェン生成や様々な触媒反応の反応素過程であり重要である。Cu(410) ステップ表面におけるエチレン (C_2H_4) 分子の吸着状態と反応性を反射赤外吸収分光法、昇温脱離法ならびに第一原理計算を用いて調べた。その結果、 C_2H_4 分子は π 結合によりステップエッジに吸着し、昇温過程で一部の分子が脱水素化することを見いだした。この課題では、さらに、飛来する C_2H_4 分子がどのように反応するのかを詳細に調べるために超音速 C_2H_4 分子線を Cu(410) 表面に照射し放射光 X 線光電子分光法により調べた。Fig. 3 に、並進エネルギー約 2 eV の C_2H_4 分子線を、表面温度 300K において照射した際の C1s ピークの露出量依存性を示す。露出量とともに C1s ピークが 283.32 eV ならびに 284.24 eV に成長している。これらの結合エネルギーが C_2H_4 分子の分子状吸着に対応していないことならびに、表面温度 300K で C_2H_4 分子が分子状で吸着できないことから、脱水素化した化学種が表面に吸着していると考えている。並進エネルギーにより反応の遷移状態に到達できた結果である。

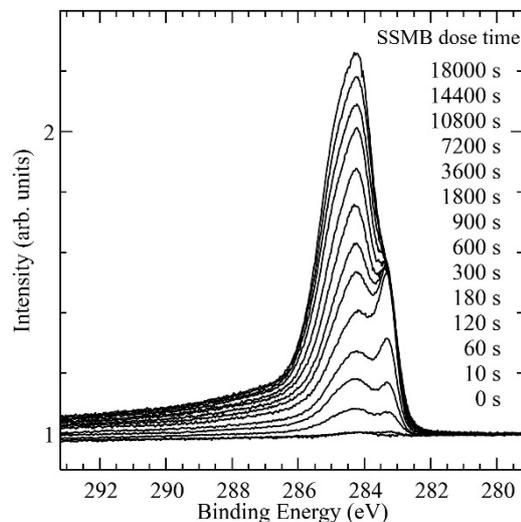


Fig. 3 C1s ピークの露出量依存性

- (5) 表面に飛来する酸素分子軸の向きが解離吸着過程に影響することが知られている。表面構造に異方性のある表面の酸化においては、酸素分子と表面の相互作用は、酸素分子軸の表面内方位に依存し、化学反応の立体効果が出現することが予想される。本課題においては、表面構造に異方性をもつ Cu(110)表面の酸化反応において立体効果を明らかにするとともに、Fig. 4のような(4 x 1)再構成構造をとる

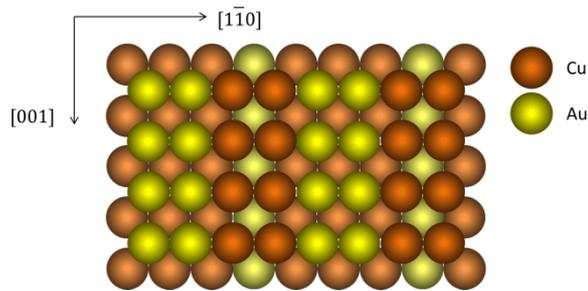


Fig. 4 Cu₃Au(110) (4 x 1)構造

Cu₃Au(110) に注目し、立体効果における合金化の効果を調べた。分子の角運動量ベクトルの向きを制御した酸素分子線を表面に入射し、初期吸着確率を測定することにより解離吸着過程における立体効果の入射エネルギー依存性を検討した。実験は物質材料研究機構の表面物性計測グループが開発した状態選別酸素分子線発生装置を用いて行った。試料は Cu(110)および Cu₃Au(110)単結晶を用いた。酸素分子の角運動量ベクトルを主として表面垂直 (Helicopter: H)、[1-10]方向 (Cartwheel Y: C_Y)、[001]方向 (Cartwheel Z: C_Z)のそれぞれに制御した酸素分子線を試料に照射し、King and Wells法によって酸素吸着確率を測定し、反応性の分子軸方向依存性を求めた。実験から得たそれぞれの主角運動量ベクトル方向における初期吸着確率を用いると、酸素分子軸方向依存性を導出することができる。Cu(110)および Cu₃Au(110)における酸素分子初期吸着確率の並進エネルギー依存性を、酸素分子軸方向ごとに測定すると、いずれの試料においても分子軸が表面平行な分子の方が表面垂直な分子よりも吸着確率が高くなった。さらに、Cu(110)では、低並進エネルギーにおいて、分子軸が表面に平行で、[1-10]と[001]を向いたものに、初期吸着確率の違いが見られた。一方、合金においてはそのような面内の吸着確率の違いは見られなかった。また、Cuの合金化にともない、反応性の低いAuのため、吸着確率は減少した。以上の結果により酸化過程における合金化の効果を解明し反応ポテンシャルを明らかにした。

- (6) 本研究課題では、高速分光法開発を目指し、可視領域 (520 -760nm) の超短パルスレーザー (パルス幅 <10fs) 使用している (Fig. 5A)。非線形分光に由来する信号はレーザー強度に依存するため、レーザー強度が高いほうが望ましい。非共軸パラメトリック増幅における pump 光の波面傾斜による光パラメトリック過程における位相整合条件の改善を行い従来10倍程度のレーザー強度を得ることに成功した。実験測定時間の短縮化のため制御システムの見直しを行った。ハードウェアに関しては、従来と全く同じであるが、制御プログラムである LabVIEW の様々な新しい機能等や関数を積極的に導入した。その結果、従来と同じ実験条件にて計測時間を1/10に短縮することに成功した。グラファイト (HOPG) を対象として、改良した超高速分光システムの評価を行った。検出法はE-Oサンプリング法である。Fig. 5Bに反射率変化の実時間追跡の結果を示す。光照射から50fsあたりまで信号が立ち上がり、140fs程度の寿命をもって減衰することがわかった。この信号をフーリエ変換することにより、関与する格子振動モードを特定することができる (Fig. 5C)。1600 cm⁻¹付近に見られる格子振動がGモードに由来する信号である。他の信号はノイズ成分である。短時間フーリエ変換解析を行うことにより、格子振動の時間発展を調べると Fig. 5Dのように時間とともに格子振動モードが緩和し、振動数が低波数にシフトすることが確認できた。

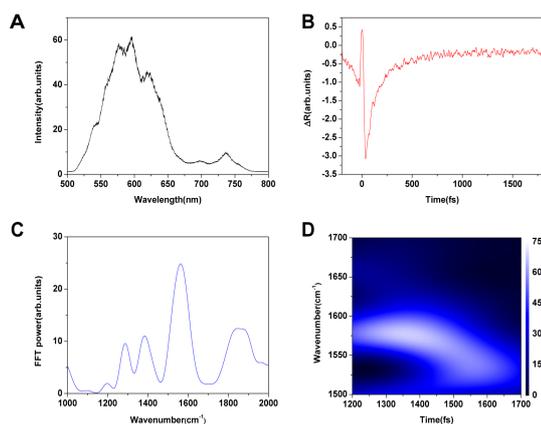


Fig. 5 グラファイトのコヒーレントフォノン分光 (A) 可視超短パルスレーザーのスペクトル (B) グラファイトの反射率変化の実時間追跡。 (C) (B)をフーリエ変換したもの (D) (B)の短時間フーリエ変換。

- (7) NO+CO 反応の研究計画を進めるため、赤外分光-配向分子線融合装置の調整を進めた。塩化メチル分子を用いて装置の調整を行い、発生分子線について、飛行時間エネルギー分析法を用いて特性評価した。これまでと同様の分子線が得られていることがわかった。六極電極に電圧を印加することにより量子状態選別が可能であることを確認し、分子線照射後の表面を赤外分光で評価可能であることを確認した。塩化メチル分子による予備実験後に NO+CO 反応を調べる予定であったが、大阪府北部地震により実験装置が倒壊してしまい、本研究については、研究期間内に終えることが出来なかった。今後、装置を修理後に、研究期間内の予備実験を基にして研究を遂行する予定である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 18 件)

- ① T. Makino, S. Zulaehah, J. Gueriba, W. A. Diño, M. Okada, CH₃Cl/Cu(410): Interaction and Adsorption Geometry, *Journal of Physical Chemistry C*, 査読有, 122, 2018, 11825-11831. DOI:10.1021/acs.jpcc.8b01296
- ② M. Okada, Y. Tsuda, A. Yoshigoe, W. A. Diño, Oxidation Processes of Copper-Gold Alloy Surface Induced by Supersonic Oxygen Molecular Beam, *Journal of Japan Institute of Copper*, 査読有, 56, 2017, 232-236.
<http://copper-brass.gr.jp/wordpress/wp-content/uploads/institute/gakkai-shi/56th/vol56-mokujiwa1-8.pdf>
- ③ A. Kokalj, T. Makino, M. Okada, DFT and TPD study of the role of steps in the adsorption of CO on copper: Cu(410) vs Cu(100), *Journal of Physics: Condensed Matter*, 査読有, 29, 2017, 194001-1~14.
DOI: 10.1088/1361-648X/aa66a3
- ④ M. Okada, Y. Tsuda, K. Oka, K. Kojima, W. A. Diño, A. Yoshigoe, H. Kasai, Experimental and Theoretical Studies on Oxidation of Cu-Au Alloy Surfaces -Effect of Bulk Au Concentration-, *Scientific Reports*, 査読有, 6, 2016, 31101-1~8.
DOI: 10.1038/srep31101
- ⑤ S. Amino, E. Arguelles, W. A. Diño, M. Okada, H. Kasai, C₂H₄ adsorption on Cu(210), revisited: bonding nature and coverage effects, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 査読有, 18, 2016, 23621-23627.
DOI:10.1039/C6CP02488B
- ⑥ Y. Tsuda, A. Yoshigoe, Y. Teraoka, M. Okada, Surface temperature dependence of oxidation of Cu₃Au(111) by an energetic oxygen molecule, *Materials Research Express*, 査読有, 3, 2016, 035014-1~8.
DOI: 10.1088/2053-1591/3/3/035014

[学会発表](計 79 件)

- ① 津田泰孝, 植田寛和, 倉橋光紀, 岡田美智雄, 酸素分子解離吸着の立体化学における合金効果: Cu(110) vs Cu₃Au(110), 第 66 回応用物理学会春季学術講演会, 2019 年.
- ② 牧野隆正 津田泰孝, 吉越章隆, 岡田美智雄, Cu 表面における超音速エチレン分子の脱水素化反応とグラフェン生成, 2018 年日本表面真空学会学術講演会, 2018 年.
- ③ 岡田美智雄, 放射光 X 線光電子分光による超熱酸素分子ビーム誘起の銅合金酸化過程解明 JAEA-QST 放射光科学シンポジウム 2018, 2018 年.
- ④ Y. Tsuda, T. Makino, H. Yoshida, A. Yoshigoe, T. Fukuyama and M. Okada, Initial oxidation of copper alloy surfaces with a hyperthermal oxygen molecular beam, ISSS-8, 2017 年.
- ⑤ T. Makino, A. Kokalj and M. Okada, The effect of surface geometry on the interaction between adsorbed CO molecules on Cu, ISSS-8, 2017 年.
- ⑥ W. A. Diño, M. Okada, K. Oka, K. Kojima, A. Yoshigoe, H. Kasai, Experimental and Theoretical Studies on Oxidation of Cu-Au Alloy Surfaces -Effect of Bulk Au Concentration-, 33rd European Conference on Surface Science, 2017 年
- ⑦ W. A. Diño, Surface as a Playground for Studying Gas-Surface Reaction Dynamics - increasing the ortho-para H₂ conversion yield via molecular orientation, a case study, 13th International Conference of Computational Methods in Science and Engineering, 2017 年
- ⑧ M. Okada, Oxidation of Cu-Au alloy surfaces with hyperthermal oxygen, Stereodynamics 2016, 2016 年
- ⑨ 岡田美智雄, 超熱エネルギー酸素分子による Cu-Au 合金表面の酸化過程解明, 日本銅学会 第 56 回講演大会, 2016 年.
- ⑩ W. A. Diño, Surface/Interface as a Foundation for Realizing Designer Materials Symposium and Workshop- Nanotechnology 2015, 2015 年

[図書](計 2 件)

- ① M. Okada, and Y. Teraoka, American Scientific Publishers(ASP), "Molecular-beam controlled chemical reactions on Si surfaces" in Encyclopedia of Semiconductor Nanotechnology, Ed. Ahamd Umar, 2017 年, Vol. 4, chapter 2, pages 61-111 (51 pages) ISBN: 1-58883-199-X

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: デイニョ ウィルソン
ローマ字氏名: DIÑO Wilson
所属研究機関名: 大阪大学
部局名: 大学院工学研究科
職名: 准教授
研究者番号 (8 桁): 60739146