

研究種目：基盤研究（B）  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18360361  
 研究課題名（和文） 水素循環プロセスのための Pt 基モデル触媒表面の構築と反応  
 研究課題名（英文） Fabrication of Pt-based model catalyst surface and chemical reaction for hydrogen cycle process  
 研究代表者  
 和田山 智正 (WADAYAMA TOSHIMASA)  
 東北大学・大学院工学研究科・准教授  
 研究者番号：20184004

## 研究成果の概要：

本研究はクリーンエネルギー源としての水素の有効利用に必須である触媒開発を念頭に、Pt をベースとする2元合金モデル触媒表面を構築しその化学特性を検討したものである。具体的には、超高真空中で表面科学の手法に基づき原子レベルで構造を規定した Pt-Fe 表面を分子線エピタキシ(MBE)法により作製し、その表面分子挙動と最表面構造との関係について議論した。その結果、高温で熱処理した Pt-Fe 合金最表面は基板 Pt 原子が表面偏析して生じた Pt スキン層が生成し、特異な分子挙動を示し触媒特性の改善に関与することを明らかにした。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	7,900,000	2,370,000	10,270,000
2007年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
2008年度	2,200,000	660,000	2,860,000
年度			
年度			
総計	13,700,000	4,110,000	17,810,000

研究分野：材料界面物性

科研費の分科・細目：材料工学・金属生産工学

キーワード：燃料電池電極触媒、分子線エピタキシ、白金、鉄、赤外反射吸収、反射高速電子線回折、低速電子線回折、昇温脱離

## 1. 研究開始当初の背景

化石燃料の資源枯渇問題とも相まって、水素を原料とするエネルギー循環システムの構築へ向け、さらなる研究の進展が切望されている。このシステムが成立するためには数多くの技術的ブレークスルーが不可欠であり、材料科学に課せられた問題も山積している。水素発生反応に有効な触媒開発分野においては、Ptに第2元素を添加して合金化し所望のシート状電極や極微粒子に成形加工後その触

媒特性を検討するのが一般的である。しかしそのような材料科学的アプローチのみでは、得られた特性がなぜ発現するのか、あるいはどのようにしてその特性を改善するのかについてのロードマップを提案することは一般に困難である。

## 2. 研究の目的

本研究は水素循環プロセスにおける燃料電池電極触媒の表面物性に焦点を当てる。す

なわち、Pt をベースとする 2 元合金モデル触媒表面を構築しその触媒特性を検討する。本研究の特徴を具体的に述べれば、超高真空(UHV:  $1 \times 10^{-8}$  Pa 以下)中で表面科学の手法に基づき原子レベルで構造を規定した Pt-X 表面を分子線エピタキシ(MBE)法により作製し、水素循環プロセスを担う水素( $H_2$ )や水蒸気( $H_2O$ )、また原料中にごく微量含まれる一酸化炭素(CO)の触媒表面における分子論的振る舞いと作製プロセスの関連を明らかにする点にある。これにより、様々な問題が指摘されている水素発生用合金触媒の活性、選択性、安定性を解決するための突破口としたい。

### 3. 研究の方法

本研究における基板単結晶表面の清浄化、合金化元素としての Fe の蒸着、低速電子線回折(LEED)、反射高速電子線回折(RHEED)、高感度反射赤外分光(IRRAS)、昇温脱離(TPD)による表面構造や分子吸着・脱離特性の検討は約  $1 \times 10^{-10}$  Torr の UHV 下、その場(in situ)で行った。装置は準備室、成膜室および分析室の 3 つのステンレス製超高真空チャンパーから構成されている。本研究では既存の装置に対し試料表面吸着分子の脱離挙動を検討する目的で、TPD 測定系を新たに構築した。具体的実験内容は以下の通りである。まず、赤外線加熱装置と四重極質量分析装置は試料基板を急速加熱し表面の吸着分子の熱脱離挙動を昇温脱離法に基づいて検討するために装着した。これにより、我々の MBE 装置の特長であるその場赤外分光に基づいた吸着種の“静的な”状態観察と TPD による熱脱離過程という“動的”状態変化を総合的に観察可能となり、構築した Pt-X 系表面における分子の吸着・脱離挙動、また表面被毒に関する詳細な検討が可能となった。Pt 単結晶基板上への Fe 堆積を膜厚および基板温度をファクターとして行った。その表面構造を RHEED、LEED により明らかにした。次に構造の規定された Fe/Pt 単結晶表面系に CO 分子をプローブとして吸着させ、C-O 伸縮振動数を IRRAS で評価しその最表面構造を議論した。また、吸着 CO 分子の脱離挙動の TPD 評価から分子の吸着強度と最表面構造の観点から議論した。

### 4. 研究成果

#### (1) 基板温度 340K で作製した Fe/Pt(111)表面系

基板温度 340K の清浄 Pt(111)表面に対し Fe を堆積後の“合金表面”を RHEED 観察し、Fe 蒸着量に対する変化を調べた。その結果、およそ 1 ML 蒸着により Pt(111)基板に対

応するストリークの外側に新たなストリークが現れた。Pt のような fcc 金属の(111)表面に他の金属元素が堆積するとき、その元素がとりうる構造には bcc(110)と fcc(111)の 2 種類が考えられる。新たに出現した RHEED ストリーク間隔に基づいて格子間隔を求めると  $\langle 112 \rangle$  方向で  $1.25 \text{ \AA}$ 、 $\langle 110 \rangle$  方向で  $2.18 \text{ \AA}$  であった。これらの値は bcc-Fe(110)よりも fcc-Fe(111)の格子間隔とよく一致している。従って、340K に保持された Pt(111)上に蒸着した Fe は fcc(111)構造をとりエピタキシャル成長することを結論した。

清浄 Pt(111)に Fe を基板温度 340K で堆積した際の飽和吸着 CO の赤外スペクトル上には on-top および bridge サイトに吸着した CO による赤外吸収が  $2090$  および  $1850 \text{ cm}^{-1}$  に現れた。また Fe 堆積により  $1950 \text{ cm}^{-1}$  付近に新たにバンドが現れる。これは堆積 Fe の bridge サイトに吸着した CO の伸縮振動に帰属される。このとき同時に現れる  $2050 \text{ cm}^{-1}$  のバンドは、後述するように Fe が表面第二層以下へ潜り込むことによって生じた Pt 表面層に on-top 吸着した CO に対応したバンドである。いずれにしても 1ML-Fe/Pt(111)表面では、清浄 Pt(111)で認められる吸着 CO のバンドはほとんど確認できない。この事実から、Pt(111)表面は 1ML 相当厚の Fe 原子によりほぼ覆われていると推定できる。

Fe 蒸着量に伴う吸着 CO バンドの波数シフトと強度変化をみると、Pt on-top サイトに吸着した CO バンドは Fe 蒸着量の増加に伴いその強度を減じながら低波数側にシフトした。このシフトの原因として、吸着 CO 分子間の双極子相互作用の低下及び Pt-Fe 間の電子的相互作用(合金化)による CO-Fe 間の結合力増加が考えられる。一方、Fe の bridge サイトに吸着した CO バンドについてみると、7ML-Fe/Pt(111)上に飽和吸着した CO に対応するバンドの波数が  $1970 \text{ cm}^{-1}$  に位置するのに対して、1ML 以下の膜厚では  $1960 \text{ cm}^{-1}$  以下のより低波数領域に現れた。これらの変化から、1ML 厚のエピタキシャル膜を形成した Fe は下地 Pt(111)基板の電子的な影響を強く受けており、その上に bridge 吸着した CO は 7ML-Fe/Pt(111)のような Pt の影響の少ない表面に bridge 吸着した CO よりも低い振動数を示すことが理解される。

#### (2) 基板温度 473K で作製した Fe/Pt(111)表面系

次に Pt 原子が最表面に露出した特異な表面構造の作製を目指した。すなわち、Fe 原子の深さ方向への拡散を促すために高温にある Pt(111)基板に Fe を蒸着した。基板温度 473K に保持した Pt(111)に Fe を蒸着し作製した試料の RHEED 像をみると、0.25ML の場合は 340K 蒸着の場合とあまり違いがない。

一方 0.5ML の場合、340K 蒸着で観察された RHEED 像には fcc-Fe(111)に対応する新たなストリークが現れていたが、473K 蒸着では認められない。このことから基板温度 473K で Fe を蒸着すると、Pt(111)基板表面には fcc-Fe(111)の領域がほとんどないと推定される。一方、Fe 蒸着量をさらに増して 1 ML 厚とすると 473K 蒸着の場合でも 343K と同様新たに現れたストリークと同間隔のストリークがみられるようになる。従って、基板温度 473K であっても 1ML 厚の Fe 蒸着により表面には fcc-Fe(111)ドメインが形成されることがわかる。以上の RHEED 観察結果から、Pt(111)基板温度を 473K に保持して Fe を蒸着すると、室温で蒸着した試料とは最表面構造が変化し、特に 0.5ML 厚でその違いが顕著であることがわかる。

更に基板温度を 473K に保持した Pt(111)に対して Fe を蒸着した試料表面に CO を曝露し、IRRAS スペクトル測定を行った。Fe 膜厚 0.25ML では 0.11L の CO 曝露により  $2080\text{cm}^{-1}$  と  $2055\text{cm}^{-1}$  にピークが現れた。この 2つのピークは曝露量増加に伴いその強度を増しながら高波数側にシフトする。 $2090\text{cm}^{-1}$  付近のピークは清浄 Pt(111)ドメインの on-top サイトに吸着した CO に対応する。一方、340K 蒸着の試料表面に見られる Fe の bridge サイトが現れる  $1950\text{cm}^{-1}$  付近にはバンドが見られない。 $0.5\text{ML}$  の Fe を蒸着した試料では CO 導入後  $2050\text{cm}^{-1}$  にピークが現れ、曝露量の増加に伴って強度を増しながら高波数側にシフトし、 $1.0\text{L}$  では  $2060\text{cm}^{-1}$  にシャープで単一バンドのみが認められる。このとき 340K 蒸着で見られていた清浄 Pt(111)表面への on-top 吸着に対応する  $2090\text{cm}^{-1}$  付近にはピークは現れない。さらに膜厚が増加し  $1.0\text{ML}$  となると  $2050\text{cm}^{-1}$  付近にピークが現れるものの、その強度は  $0.5\text{ML}$  に比べ弱い。また、 $1930\text{cm}^{-1}$  付近には Fe に起因すると考えられるピークも出現した。

基板温度を 473K に保持して Fe を蒸着した場合と、基板温度 340K の場合を同一膜厚で比較すると、前者では  $2060\text{cm}^{-1}$  付近のバンド強度が著しく増加した。一方、清浄 Pt(111)に on-top 吸着した CO に対応する  $2090\text{cm}^{-1}$  のバンドや Fe 原子に bridge 吸着した CO による  $1960\text{cm}^{-1}$  のバンドについては、その強度は著しく減少、もしくはバンドそのものが現れない。Fe に吸着した CO のバンド強度は、Pt(111)に吸着した場合に比べ一般に弱い。したがって、 $2060\text{cm}^{-1}$  に現れたバンドは Pt 原子に吸着した CO によるバンドに対応すると考えられる。この場合、最表面の Fe 上に吸着した CO によるバンドは認められないことから、基板を構成する Pt 原子が蒸着 Fe 原子よりも表面 (真空) 側に存在することが示唆される。この最表面 Pt 層の形成過程

については 4-(3) で詳しく述べる。更に清浄 Pt(111)上で認められる bridge 吸着した CO によるバンドもこの場合スペクトル上に現れない。今後このような変化が生じる理由について詳細に検討する必要があるが、いずれにしても表面の Pt 原子 (層) は内部に位置する Fe 原子の電子的な影響を受けるため、清浄 Pt(111)の場合とは大きく異なり on-top 吸着した CO 分子の振動数が  $30\text{cm}^{-1}$  程低波数側にシフトし、bridge 吸着した CO による吸収が消失すると考えられる。

ところで何故  $0.5\text{ML}$  厚の Fe 原子が存在すると吸着 CO のピーク波数に最も顕著な変化が現れるのであろうか。Koel らは Pt(111)基板へ Fe を真空蒸着し、その後の熱処理による Fe-Pt の合金化を XPS、LEED、および低速イオン散乱 (LEIS) により調べた。それによれば、Pt(111)基板上に単原子層程度の Fe 原子を蒸着後  $500\text{K}\sim 800\text{K}$  でアニールすると Fe-Pt は合金化するが、上記温度範囲では Fe 原子は自由に Pt(111)基板内部に拡散せず、表面層 (光電子の脱出深さである  $10\sim 16\text{\AA}$  程度) にとどまることを見出している。しかもこのとき LEIS から評価した表面組成は  $45\%\text{Fe } 55\%\text{Pt}$  であり Fe と Pt の組成がほぼ  $1:1$  のとき表面合金構造が安定する。本研究で見られた吸着 CO のピーク位置に関する一連の結果、すなわち  $0.5\text{ML}$  厚 Fe のとき特異な表面構造が形成されるとする事実は、Koel らの結果とよく対応している。

### (3) Pt 表面層の形成と CO 被毒

本研究で述べてきたように、特に高温にある Pt(111)基板に対して Fe 原子を蒸着すると蒸着 Fe 原子の上に Pt 原子層が存在する構造が得られる。Stensgaard らは、Cu 単結晶表面に Pd を真空蒸着して得られる表面規則合金の形成過程を最表面における原子の置換と表面原子の移動により説明している。図 1 にその蒸着過程モデルを示す。単結晶表面を使用しても、実際の基板表面にはある密度の欠陥 (キンク、ステップ、転位等) が存在する。蒸着および基板原子の移動 (置換) にはステップが関与する。そのため基板上に異種原子を蒸着したにもかかわらず、最表面に基板原子による表面層が形成される場合がある。すなわち、ある運動エネルギーを有する蒸着原子は表面に到達すると基板原子を押し出し表面に堆積する。押し出された基板原子は表面を移動しステップにトラップされる。この繰り返しにより基板ステップが水平方向に伸びていき、結果として蒸着原子を覆う。基板温度が低温ならば、表面での原子移動が抑制されるのでこのようなステップを介した成長も抑えられる。逆に高温ではステップ成長が起りやすく、蒸着原子が基板原子により速やかに覆われるであろう。本研究

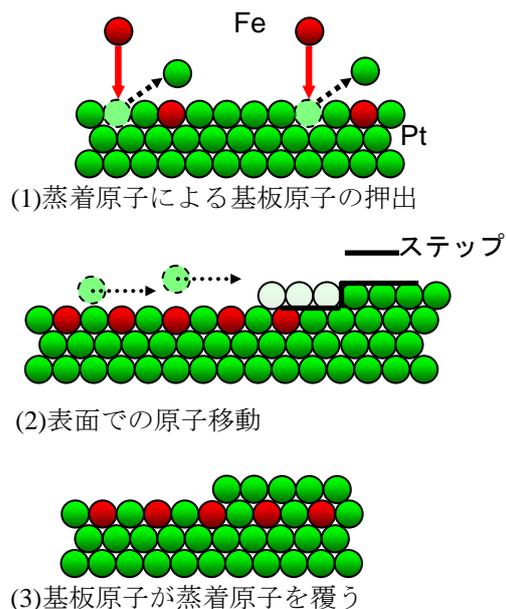


図1 ステップ成長モデル

の Fe/Pt 系における最表面 Pt 層の形成も同様なステップ成長モデルで説明することができると考えられる。さらに、この系における Pt スキン層生成の駆動力として表面エネルギー差を上げることが出来る。Pt の方が表面エネルギーが低いので表面偏析が起きやすいことも一因であろう。

基板温度 473K で 0.5ML 相当の Fe 原子を蒸着することにより得られる Fe がその内部に位置した最表面 Pt 層と清浄 Pt(111)基板のそれぞれの表面に CO が吸着した場合について CO バンドのピーク位置と強度について比較した。その結果、CO 導入初期の被覆率が低い段階では、吸着 CO 分子間の双極子間相互作用の影響が相対的に低い。つまり CO 導入初期においては基板の電子状態の違いが吸着 CO 分子の振動数により強く反映される。実際に CO 曝露量 0.1L では Pt(111)の  $2083\text{cm}^{-1}$  に対し、Fe/Pt の場合  $2044\text{cm}^{-1}$  と、バンド位置は  $40\text{cm}^{-1}$  近く低波数側に現れている。Watanabe らは Pt-Fe 合金の XPS 測定に基づいて、Pt に Fe や Ru 等を添加した場合の耐 CO 被毒特性の向上について議論している。それによれば、被毒特性を改善する Fe、Ni、Co 等の添加元素の場合、XPS で測定した Pt の 4f バンドは正方向に  $0.2\sim 0.8\text{eV}$  程度シフトしている。実際に本研究で作製した試料の XPS スペクトルの深さ方向変化を測定したところ、本研究においても同様の化学シフトが観測された。ここで吸着 CO の分子軌道と Pt の d バンドの関係を考えると、XPS で観測された正方向への化学シフトは、フェルミレベルを基準にして深い（真空レベルから遠い）方向へシフトすることを意味している。吸着 CO の反結合性分子軌道 ( $2\pi^*$ ) 準

位には変化がないと仮定すれば、Fe の添加による Pt-d バンドのシフトにより吸着 CO の  $2\pi^*$  への電子移動 (back-donation) は起こりにくくなる。基板金属からの back-donation が低下すれば、 $2\pi^*$  反結合性軌道における電子密度が低下し、結果として吸着 CO バンド位置は高波数側へシフトすると考えられる。これに対して本研究で行った吸着 CO の IRRAS 測定では、CO バンド位置は清浄 Pt(111)と比較し低波数側へ大きく ( $30\sim 40\text{cm}^{-1}$  程度) シフトしている。従って、Fe 原子の存在による吸着 CO バンドの低波数側へのシフトの原因を back-donation の増加により説明することはできない。観測された振動数の低波数側へのシフトは、CO 分子と基板表面との結合距離が変化し、C-O 間の振動が変化した等の他の要因を考慮する必要がある。

ところで CO 曝露量 0.2L 付近までは、Pt(111)に比べ Fe/Pt 表面に吸着した CO の IRRAS バンド強度は弱い。このことは、Fe 原子が表面第二層以下に存在することで、特に CO 被覆率が低い場合に表面固着確率が低下していることを示唆している。燃料電池プロセスでは、原料にごくわずかに含まれる CO ( $\approx 10\text{ppm}$  程度) が触媒特性の安定性に悪い影響(表面被毒)を及ぼすが、特に CO 被覆率が低い領域で清浄 Pt(111)と Fe/Pt(111)に対する CO の吸着のしやすさに差が見られることは興味深い。ところで IRRAS バンド強度には表面分子の存在量(表面被覆率)以外に分子配向等も影響を与える。したがって、表面被覆率の議論に IRRAS バンド強度は必ずしも適当ではない。そこで清浄 Pt(111)試料と基板温度 473K で Fe を 0.5ML 蒸着した Pt(111)試料表面に 0.1L の CO を曝露後の表面からの CO 脱離スペクトルを比較した。両者の面積強度を比較すると後者で約 40%程度減少しており、同一導入量であっても吸着 CO 量が少ないことがわかった。また、表面の Pt(111)表面からの脱離ピーク温度は 442K であるのに対して、473K 蒸着 Fe/Pt(111)表面では 430K に低下している。それぞれの活性化エネルギーを Redhead の近似式に基づいて見積ると、前者で  $118\text{kJ/mol}$ 、後者で  $115\text{kJ/mol}$  である。以上の TPD 測定結果からも、第二層以下に Fe が存在することで生じる Pt 表面層では CO の吸着、すなわち表面被毒が起こりにくいことがわかる。

#### (4) 基板温度 334K で作製した Fe/Pt(100)表面系

単結晶基板を Pt(100)に変えて表面構造と分子吸着・脱離挙動との関係を Pt(111)基板の場合と比較検討した。基板温度 343K にある Pt(100)基板に対して、膜厚を変えて Fe を

堆積した前後の LEED 図形変化、並びにとそれぞれの表面に CO を飽和吸着させた場合の赤外スペクトルを調査した。UHV 中で清浄化した Pt(100)表面の LEED 図形には基本スポットの間に 5 倍周期のサブスポットが現れた。この図形は 5x20 再構成構造、いわゆる Pt(100)-hex 構造に対応したものである。この hex 表面に CO を吸着させると 2089 および 2081 $\text{cm}^{-1}$  に 2 本のバンドが現れる。それぞれのバンドは Pt(100)表面の p(1x1)および hex ドメインのそれぞれに吸着したバンドに帰属される。この hex 表面に対して Fe を堆積すると、LEED 図形は hex から p(1x1)へと変化する。すなわち、再構成表面は 0.25ML 厚の Fe 原子の存在により再び本来の(100)表面構造に変化する。Fe 堆積後の表面に対する吸着 CO の赤外吸収スペクトルを、清浄 Pt(100)-hex 表面のそれと比較すると、わずか 0.25ML 厚の Fe 堆積により、p(1x1)および hex ドメインに吸着した CO バンドはブロードとなり、2082 および 2069 $\text{cm}^{-1}$  にシフトする。すなわち、膜厚 0.25ML では Fe 原子が基板表面を完全に覆っておらず hex ドメインが残存していることがわかる。

Fe 膜厚が増加すると LEED 図形のコントラストが低下するとともに吸着 C-O 伸縮振動数が低波数側にシフトした。1.0ML 堆積後の表面では CO 伸縮振動数は 2029 $\text{cm}^{-1}$  に現れる。すなわち基板温度が 343K であるにも関わらず、C-O 伸縮振動数からは堆積 Fe 原子が基板 Pt 原子に影響を与えその振動数が清浄 Pt 表面と比較し 60 $\text{cm}^{-1}$  も低波数側にシフトしている。Pt(111)基板の場合、堆積温度 343K では Fe 原子と Pt 基板原子は相互拡散せずエピタキシャル成長する。また吸着 CO による赤外吸収バンドは膜厚増加に従って清浄 Pt(111)-CO バンドからエピタキシャル Fe-CO バンドに変化し、堆積 Fe 原子の影響を受けた Pt 原子上に吸着した CO バンドはみられない。すなわち、基板単結晶の指数面に応じて Fe-Pt 間の相互拡散(合金化)温度が異なる。LEED 図形から Pt(100)基板は UHV 中の清浄化過程においてその最表面が 5x20 再構成構造(hex)をとる。hex 構造は最稠密 111 面に近い構造であり原子密度が高い。当然基板単結晶全体の原子密度は一定なので hex 再構成表面の第 2 原子層はその分原子密度が低下することが知られている。そのような第 2 原子層の原子密度の低下は堆積 Fe 原子と基板 Pt 原子間の相互拡散をより促進すると考えられ、その結果として(111)基板と比較して低温で相互拡散が起こると考えられる。

- (5) 高い基板温度で作製した Fe/Pt(100)表面系  
さらに Fe-Pt 合金化と堆積基板温度との関

係を検討するために、Fe 原子を堆積した表面において CO の吸着・脱離挙動の堆積基板温度依存性を赤外および TPD スペクトルに基づいて検討した。基板温度 343K の場合、膜厚 0.25ML でみられた 5 倍周期のサブストリーク(サブスポット)はそれ以上の膜厚では消失し 1x1 構造をとる。ところが 623K で 0.5ML 厚の Fe を蒸着した場合、再び 5 倍周期のサブストリーク(スポット)が現れる。すなわち電子線回折図形から判断すれば基板温度 343K 蒸着の場合、基板表面の hex 構造が 1x1 構造へ変化するのに対して、蒸着時の基板温度がおおむね 600K 以上になると電子線回折図形のコントラストが上昇し、表面が平坦化するとともに hex 構造を再びとるようになると考えられる。

赤外及び TPD スペクトルの堆積基板温度依存性を検討した。基板温度が 873K に上がると赤外スペクトル上の C-O 伸縮振動数は 2070 $\text{cm}^{-1}$  に現れており、Pt スキン層の生成を示唆している。このとき LEED 図形が hex 構造に対応したパターンを示していることから Pt(100)表面の場合、高温での熱処理によって基板 Pt 原子の表面偏析に基づいた Pt スキン層が堆積 Fe 原子層上部に生成するが、その最表面は清浄 Pt(100)基板と同様 hex 構造をとることがわかる。紙幅の関係で詳しくは述べないが、Pt(100)-hex 表面における Pt スキン層の生成温度は Pt(111)基板の場合と比較して 100K 程低い。さらに、TPD スペクトルを比較すると hex 構造の Pt スキン表面に吸着した CO の脱離温度は最も低い。すなわち Pt(100)-hex 面からの CO 脱離温度は 520K であるのに対して、343K および 873K で作製した 0.5ML-Fe/Pt(100)-CO の場合脱離ピーク温度はそれぞれ 470K と 430K であった。TPD の結果は、Pt(100)基板においても Pt スキン層-CO 吸着強度が清浄 Pt 表面と比較し低下すること、すなわち耐 CO 被毒性が改善されることが理解される。

#### 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 5 件)

- ① T.Wadayama, H.Yoshida, N.Todoroki, S.Oda, "IRRAS and TPD Investigations of Carbon Monoxide Adsorption on MBE grown Fe on Pt(100)", e-J. Surf. Sci. & Nanotech., 7,245-248, (2009), 査読有
- ② T.Wadayama, H.Yoshida, N.Todoroki, S.Oda, "Infrared Reflection Absorption Study for Carbon Monoxide Adsorption on Chromium Deposited

- Cu(100) Surfaces”, *Mat. Trans.*, 50,8 19-824,(2009), 査読有
- ③ T.Wadayama, H.Osano, K.Murakami, T.Maeyama, H.Yoshida, “Infrared reflection absorption study of carbon monoxide adsorption on Fe-deposited Pt(111) surface”, *J.Phys., Conf. Ser.*,100,012007,(2008), 査読有
- ④ T.Wadayama, H.Osano, H.Yoshida, S.Oda, N.Todoroki, “Carbon Monoxide Adsorption on Pd-deposited Cu(110) Surface: Infrared Reflection Absorption and Temperature”, *Appl. Surf. Sci.*,254,5380-5384(2008), 査読有,受理
- ⑤ T.Wadayama, H.Osano, T.Maeyama, H.Yoshida K.Murakami, S.Oda, N.Todoroki, “Infrared Reflection-Absorption Study of Carbon Monoxide on Fe/Pt(111) Bimetallic Surfaces”, *J. Phys. Chem. C*,112,8944-8950,(2008),査読有

[学会発表] (計 10 件)

- ① 吉田弘智、小川浩一郎、和田山智正、Co堆積Pt単結晶表面の構造と分子挙動、日本金属学会、東京工業大学、2009/3/29
- ② 吉田弘智、轟直人、小川浩一郎、和田山智正、Fe族金属を堆積したPt(100)表面上におけるCOの吸着脱離挙動、触媒材料研究会、一ノ関、2008/11/11
- ③ T.Todoroki, H.Yoshida, S.Oda, T.Wadayama, Infrared Reflection Absorption Spectral Study for CO Adsorption on Pd/Pt(111) Bimetallic Surfaces, 4th Vacuum and Surface Sciences Conference of Asia and Australia, Matsue, 2008/10/28
- ④ 吉田弘智、轟直人、小川浩一郎、和田山智正、Fe族金属を堆積したPt(100)表面上におけるCOの吸着脱離挙動、日本金属学会、熊本大学、2008/9/24
- ⑤ T.Wadayama, IRRAS and TPD Investigations of Carbon Monoxide Adsorption on MBE grown Fe on Pt(100), 14<sup>th</sup> International Conference on Surface and Thin Films, Dublin (Ireland) , 2008/6/30
- ⑥ 和田山智正、原子レベルでの表面構造設計と機能：規則表面合金系の MBE 構築と化学特性、日本金属学会、武蔵工業大学、2008/3/27
- ⑦ 吉田弘智、小田省吾、轟直人、和田山智正、Pd-Cu(110)系の表面構造と CO 分子の吸着脱離挙動、日本金属学会、岐阜大学、2007/9/20

- ⑧ T.Wadayama, Infrared reflection absorption study of carbon monoxide adsorption on Fe-deposited Pt(111) surface, 17<sup>th</sup> International Vacuum Conference, Stockholm (Sweden) , 2007/7/3
- ⑨ 小佐野寛志、村上幸司、前山俊明、吉田弘智、和田山智正、Fe-Pt 表面系の MBE 構築と吸着 CO 分子の赤外スペクトル、日本金属学会、千葉工業大学、2007/3/28
- ⑩ 小佐野寛志、村上幸司、前山俊明、吉田弘智、和田山智正、Fe-Pt 表面合金の作製と吸着 CO 分子の赤外スペクトル、日本金属学会、東京工業大学、2006/9/15

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

和田山 智正 (WADAYAMA TOSHIMASA)  
 東北大学・大学院工学研究科・准教授  
 研究者番号：20184004

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者