

展望

中性子の鉄鋼研究への応用-6

中性子反射率法による埋もれた金属界面の精密構造解析 Structural Analysis of Buried Metal Interfaces by Neutron Reflectometry

鳥飼直也
Naoya Torikai

高エネルギー加速器研究機構
物質構造科学研究所 中性子科学研究施設

1 はじめに

近年の物質・材料の複合化、デバイスの微小化により物質・材料の界面を理解することへの要請が急速に高まり、中性子をプローブとする精密な物質構造観察法の1つである中性子反射率 (Neutron Reflectivity) 法への関心が高まっている。

また、物質の界面では非常に狭い空間内で物質同士が接するためにバルク中では見られない性質がしばしば見られ、学問的な観点からも多くの研究がなされている。

中性子反射率法は、試料の深さ方向に非常に高い空間分解能を有するために、他の測定手法では観察が難しい物質の表面・界面や薄膜といった微小な構造の観察に優れている。

これまでも金属をはじめとする無機物 (ハードマテリアル) から高分子や界面活性剤等の有機物 (ソフトマテリアル) まで様々な物質・材料の界面研究に中性子反射率法が適用され、多くの価値ある成果が挙げられてきた。また、プローブとして用いる中性子の特長により、液体表面や液体/液体界面のような自由界面は勿論のこと、物質内部に深く埋もれた固体/液体界面や固体/固体界面の非破壊探索、さらには磁気モーメントの空間分布の観測にも用いられる。ここでは、本「展望シリーズ」による中性子による物質研究の紹介の一環として、中性子反射率法についての測定原理と埋もれた金属界面を対象とした研究例を紹介する。

2 中性子反射率法の測定原理

2.1 中性子反射率法とその特長

反射率法は、屈折率が異なる物質間のフラットな界面において中性子やX線が光学的に反射される性質を利用し、物質の表面・界面や薄膜のような微小な構造をサブnmスケールの高い精度で観察する測定手法である。実際の測定では、試

料表面に微小な角度で中性子やX線を入射し、その試料構造を反映して反射される中性子・X線の位置 (角度) と強度が正確に観測される。特に、試料表面に対する中性子・X線の入射角 θ_0 と反射角が等しい位置にみられる反射を鏡面反射 (Specular Reflection) と呼び、それを入射角 θ_0 あるいは中性子・X線の波長 λ を変え、試料表面に対し垂直な方向の中性子・X線の移行運動量 $q_z (=4\pi \sin \theta_0 / \lambda)$ の関数として観測することにより、試料中の深さ方向の構造が観察される (図1)。このように鏡面反射は、深さ方向の構造観察には優れているが、試料の面内で構造を平均化するために、面内に存在する微小な構造の観察は得意ではない。一方、鏡面反射条件から外れた位置 (入射角 $\neq$ 反射角) に観測される微弱な非鏡面反射 (Off-Specular Reflection) には試料の面内構造が反映されるが、非常に大きな入射ビーム強度が必要となる。

一般に、物質の中性子に対する屈折率 n は散乱長密度 $\rho \Sigma$ ($b_i \pm p_i$) により次のように表される。

$$n^2 = 1 - 4\pi\rho\Sigma(b_i \pm p_i)/k^2 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ρ は物質の数密度、 b_i と p_i はそれぞれ元素が有する核散乱長と磁気散乱長を示す。また、 k は中性子の波数ベク

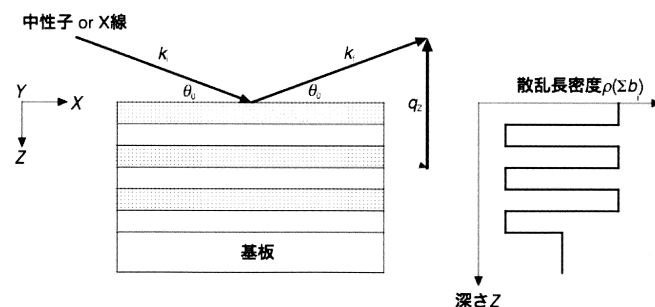


図1 鏡面反射率測定のための幾何学的な模式図
(中性子の試料深さ方向の移行運動量は $q_z = k_f - k_i$ で表される。)

トルの大きさで、 $2\pi/\lambda$ と表される。核散乱長 b_i の大きさ¹⁾は原子番号に依らずランダムなため、電子数密度によって n の大きさが決まるX線と比べ、中性子は水素やリチウム等の軽元素や、原子番号が近い元素同士の識別に優れている。また、同じ元素であっても同位体同士で b_i の大きさが異なり、特に軽水素(H, $b_H = -3.74 \times 10^{-4} \text{nm}$)と重水素(D, $b_D = +6.67 \times 10^{-4} \text{nm}$)の間に大きな差があることを利用して、分子中に多数の水素を有する有機物(ソフトマテリアル)の全体あるいは特定の部位をD置換することにより、その性質を大きく変えることなく部分的に試料中のコントラストを際立たせたり、あるいは逆に打ち消したりすることがなされる。X線ではこれら同位体同士を識別することができないため、同じ試料でもX線と中性子で異なる相補的な構造情報が得られる。中性子は電荷を持たず物質との相互作用が小さいために、物質透過性が高く、物質内部に深く埋もれた界面についても試料を壊すことなく非破壊でアプローチすることができる。このことを利用して、固体/液体界面の構造観察や、容器を必要とする真空、ガス雰囲気、高圧等といった特殊な試料環境が作り出される。さらに、詳細な原理については割愛するが、中性子はスピンを有するため、この性質を利用して作り出される偏極中性子(Polarized Neutron)は磁性体や人工格子等の磁気モーメントの空間分布の観測に力を発揮する²⁾。

2.2 中性子反射率計と国内現状

中性子反射率計は、プローブとして用いる中性子の発生原理の違いによって、原子炉タイプとパルス中性子タイプに大別される。原子炉タイプでは、一般に、単色化された波長 λ が一定の中性子を用い、試料表面に対する中性子の入射角 θ_0 を測定点毎に変え、いわゆる $\theta-2\theta$ スキャンにより鏡面反射が観測される。国内では、茨城県東海村の日本原子力研究開発機構(原子力機構)のJRR-3原子炉に、京都大学原子炉実験所が所有するMINE2反射率計³⁾と原子力機構が最近に新設したSUIREN反射率計⁴⁾がある。SUIREN反射率計については自由界面試料への適用を可能にする試料水平型モードの立ち上げも後に計画されているが、現状ではJRR-3原子炉の2台の反射率計はいずれも試料を立てて測定を行う試料垂直型の装置である。一方のパルス中性子タイプでは、陽子加速器を用いて加速した陽子ビームにより重金属ターゲットの原子核を破碎して作り出されるパルス状の白色の λ 幅が広い中性子が用いられる。このタイプの装置では、中性子の発生から検出器に到達するまでの中性子の飛行時間(Time-Of-Flight, TOF)を計測することにより、飛行距離とTOFから中性子の波長 λ (エネルギー)が識別される。図2にパルス中性子反射率計で測定された中性子の入射スペクトル I_{IN} と

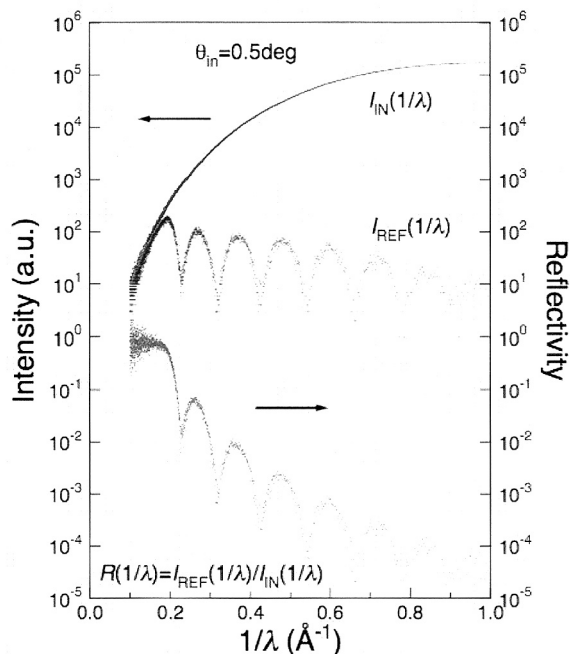


図2 パルス中性子反射率計で測定された入射中性子スペクトル $I_{IN}(1/\lambda)$ と入射角 $\theta_0=0.5$ 度でのニッケル薄膜の反射中性子スペクトル $I_{REF}(1/\lambda)$ およびそれらより変換された鏡面反射率プロファイル $R(1/\lambda)$

シリコン基板上のニッケル薄膜から得られた鏡面反射スペクトル I_{REF} を $(1/\lambda)$ の関数として示す。鏡面反射率プロファイル $R(1/\lambda)$ は反射スペクトルを入射スペクトルで規格化することにより得られる。パルス中性子タイプの特徴は、図2からもわかるように、広い λ 幅を有する白色中性子を用いることにより、中性子の入射角 θ_0 を変えることなく、即ち試料を動かすことなく、一度に広い q_z 範囲の反射率を測定できることである。このためパルス中性子タイプの装置は、試料水平型にすることにより液体表面や液体/液体界面のような自由界面試料の観測に最適であり、また大きな線源強度が得られれば界面構造の時間変化や界面反応を追跡する時分割での反射率測定に適している。国内では、後述する次期計画への移行のために平成18年3月でシャットダウンしたが、茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構中性子科学研究施設(KENS)で、自由界面を対象とする試料水平型のARISA反射率計⁵⁾と偏極中性子による磁気構造の観察が可能な試料垂直型のPORE反射率計⁶⁾により様々な物質界面の研究が展開されていた。KENSの中性子源は、陽子加速器出力が3kWで、線源強度が必ずしも大きくなかったため、それら反射率計では日オーダーの時間を使って 10^{-6} 台の反射率が測定される状況であった。

現在、高エネルギー加速器研究機構と原子力機構の共同プロジェクトとして、茨城県東海村の原子力機構キャンパス内に大強度陽子加速器計画(J-PARC)の建設が進められている⁷⁾。このJ-PARCの主要な実験施設の1つとして物質・生

命科学実験施設内に陽子加速器出力が1 MWの世界最大級の大強度パルス中性子源が実現される。計画では、平成20年度の初めに最初中性子ビームが作り出される予定で建設が進められている。このJ-PARCパルス中性子源に試料水平型中性子反射率計の設置提案がなされ、ビームライン・装置設計が進められている⁸⁾。J-PARC反射率計では、KENSと比べ少なくとも数百倍の入射中性子強度の増加が見込まれることから、KENSでは日オーダーの時間を要していた測定が分オーダーの短時間で済むことになる。また、従来の反射率測定では、試料の大きさ(面積)によって観測強度を稼ぐために、直径が数十mmから場合によっては100 mmもの大きな試料が用いられていた。試料によっては、これだけの大きな面積にわたって均一な表面を準備することが困難なために、中性子反射率法が適用できない場合もあったと想像する。J-PARC反射率計では、これまでより小さな試料に対して測定が可能になり、これによって中性子反射率法に対するハードルが下がり、その適用範囲が大きく拡大することが期待される。さらに、J-PARC反射率計では、線源強度の増加を利用して、試料面内の微小構造を観察するための斜入射回折・小角散乱オプションや、界面ダイナミクスを直接観測するための中性子スピンエコーオプション⁹⁾等の新しい測定技術の導入が検討されている。

2.3 中性子反射率法により得られる構造情報

図2に示したSi基板上に作られたニッケル薄膜からの鏡面反射率プロファイルをもう少し詳しく見てみると、 q_z ($\propto 1/\lambda$) が小さな領域に反射率が1となる全反射(Total Reflection)が見られ、 q_z が全反射臨界値 $q_{z,c}$ より大きくなるのに伴って反射率が急激に減少していくのがわかる。この $q_{z,c}$ 値は物質の散乱長密度によって $q_{z,c}^2 = 16\pi\rho(\sum b_i)$ と表されるため、全反射 $q_{z,c}$ 値を正確に測定することにより物質の密度が見積もられる。また、プロファイル中には、薄膜の空気表面とSi基板界面のそれぞれで反射された中性子が干渉することにより、薄膜の厚みに応じて周期的な振動パターン(Kiessig フリンジ)が観測される。このKiessig フリンジの繰り返し周期 Δq_z より薄膜の厚み d を $2\pi/\Delta q_z$ と見積もることができ、ここに示したニッケル薄膜の場合には膜厚が48 nmと見積もられる。さらに、反射率プロファイル全体の q_z 依存性からは薄膜の空気表面あるいは基板界面の粗さに関する情報が得られる。薄膜のこれら表面・界面が全く粗さのない理想界面である場合には、反射率プロファイルは q_z^{-4} の依存性を示すことが知られる。しかし、実在界面は多かれ少なかれ必ず粗さを持ち、反射率プロファイルは界面の粗さが大きいほど減衰の仕方が大きくなる。実際の反射率プロファイルの解析では、試料深さ方向の散乱長密度の分布(各

層の厚み・散乱長密度・層間の界面厚みがパラメータとなる。)を仮定し、それから計算される反射率曲線を実測値にフィットさせることにより試料の構造情報が得られる。詳細な中性子反射率法の測定原理および解析法については、成書¹⁰⁾やレビュー論文^{11, 12)}を参照して頂きたい。ここでは、反射率プロファイルの説明のために単純な基板上的単層膜を例に挙げたが、実際には、複雑な多層構造や構造がなだらかに変調する試料に対しても中性子反射率法は適用される。一般に中性子反射率法は、膜厚で表すと単分子膜が有する1 nm程度から厚い方の限界としては数百 nmの試料に対し適用され、通常の機械加工面を持った試料の測定には難しいとされている。

3 埋もれた金属界面への応用例

ここでは、鉄鋼研究への直接的な応用例ではないが、中性子反射率法による研究例として、埋もれた金属界面に関わり、またそれらアプローチが鉄鋼研究への展開のヒントになり得そうなトピックスを幾つか紹介する。

3.1 金属薄膜の水素吸蔵過程における *in-situ* 中性子反射率測定¹³⁾

金属の薄膜中への水素吸蔵メカニズムを理解することを目的として、水素存在(水素圧: 10^{-3} –900 mbar, 温度: 185 °C)下における多結晶のFe/Nb (110) とエピタキシャルのW/Nb (001) 多層膜の層構造の変化が*in-situ* 中性子反射率測定により観測された。図3に異なる水素圧でのFe/Nb多層膜の鏡面反射率プロファイルと比較する。プロファイル

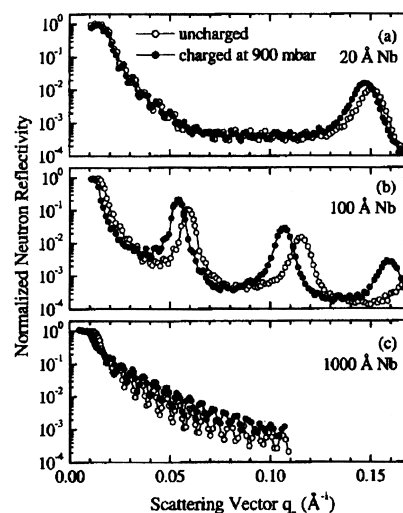


図3 調製直後および水素圧900mbarの条件で測定されたNb層の厚みが異なるFe/Nb多層膜の鏡面反射率プロファイル
Reprinted with permission from Ch. Rehm et al¹³⁾.
Copyright 2002, The American Physical Society.

中には多層膜の繰り返し構造に起因するBraggピークが観測され、Fe層の厚みはいずれも2.6 nmと揃えられているためNb層の厚みの増加に応じてBraggピークの間隔が狭くなる。Nb及びH原子の核散乱長 b_i の値はそれぞれ $7.05 \times 10^{-6} \text{ nm}$ 、 $-3.74 \times 10^{-6} \text{ nm}$ と大きく違うことから、水素がNb層中に吸収されれば、Nb層の見掛けの散乱長密度は小さくなり、Fe層との間のコントラストは強調されることになる。実際の水素存在下で得られた反射率プロファイルを見ると、水素が存在しない場合と比べ、Braggピークは高くなり、しかもピーク位置が低 q_z 側にシフトすることから、水素圧が掛けられた場合にはNb層中に水素が吸収されることがわかる。Nb層が比較的厚い試料では、水素の存在により全反射臨界 $q_{z,c}$ 値も低 q_z 側にシフトしている。反射率プロファイルの解析により得られたNb層の厚みと見掛けの散乱長密度よりNb層中に吸収された水素量が見積もられ、水素吸収量はNb層が厚いほど大きいことが明らかにされた。また、図4には反射率より見積もられたNb層の厚みと、X線回折により得られたNb(110)の面間隔の増加量が比べられている。これから水素圧の増加によって、Nb(110)の面間隔よりもNb層としてのマクロな厚みの増加が遥かに大きいことが明らかになった。ミクロ構造の異なるW/Nb(001)多層膜においてもFe/Nb(110)と同様の結果が得られた。この測定例から、中性子反射率法の特長な試料環境との組み合わせ易さが示されるとともに、例えば鉄鋼材料中の特定元素の分布を観測することへの応用が考えられる。

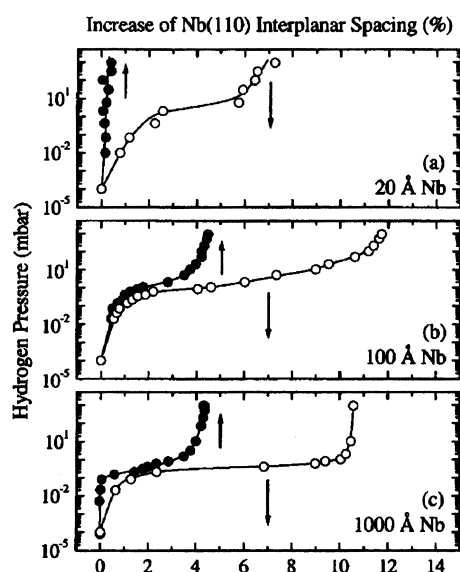


図4 様々な水素圧におけるFe/Nb多層膜中のNb層の厚みおよびNb(110)面間隔の増加量の比較
Reprinted with permission from Ch. Rehm et al¹³.
Copyright 2002, The American Physical Society.

3.2 電気化学反応における不動態酸化皮膜の *in-situ*中性子反射率測定¹⁴⁾

プローブである中性子の高い物質透過性を利用して、中性子反射率法ならではの物質内部に深く埋もれた固体/液体界面にアプローチした研究例を示す。この固体/液体界面測定は、鉄鋼研究の重要なトピックスの1つである“腐食”の研究に応用できると考えられる。ここでは、塩水溶液との界面において電気化学反応による金属Tiの腐食挙動を明らかにすることが目的とされた。図5に測定に使用された固体/液体界面セル（電気化学セル）の模式図を示す。スパッタリングで研磨面上にTi薄膜が調製されたSi基板（直径100 mm）をセルに組み込むことにより、NaCl水溶液との接触界面が作り出された。また、電気化学反応による界面構造の変化を*in-situ*で観測するために、Ti薄膜を電極の1つに、対電極としてセルに組み込まれたPt箔との間に電位が加えられた。通常の反射率測定と異なり、中性子は空気層から試料表面に入射されるのではなく、厚いSi基板の側面から基板中を通して観測対象である固体/液体界面に入射される。また界面で反射された中性子についてもSi基板を通して観測されるため、中性子はSi基板中をトータルで100 mmもの距離を通過することになり、中性子の透過率としては入射中性子に対し17%の強度が観測される。図6にNaCl水溶液に接触させる前のTi薄膜からの鏡面反射率プロファイルが示されている。散乱長密度 $\rho(\Sigma b_i)$ の高いSi基板($2.07 \times 10^{-4} \text{ nm}^{-2}$)から低いTi層($-1.95 \times 10^{-4} \text{ nm}^{-2}$)に中性子が入射されるために反射率プロファイル中に全反射領域は観測されないが、Ti薄膜の膜厚を反映した周期的なKiessigフリッジが見られる。この反射率プロファイルの解析により、Si基板上のTi薄膜の厚みは46.1 nmで、その空気表面には4.7 nmの酸化層が存在することが明らかになった。このTi薄膜を電極としてNaCl水溶液の存在下で+2 Vの電位を印可すると、

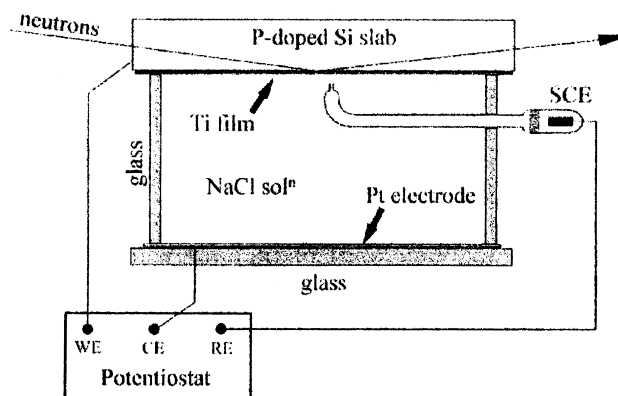


図5 測定に用いられた電気化学セル（固体/液体界面セル）の模式図
Reprinted with permission from Z. Tun et al¹⁴.
Copyright 1999, The Electrochemical Society.

Ti層の見掛けの $\rho(\Sigma b_i)$ が増加し、酸化反応の進行によって全体の厚みが11.2 nmに増した酸化層の中でTi層側の $\rho(\Sigma b_i)$ が高い二層構造が形成されていることが明らかになった。図7に、+2 Vの電位を印可した後に、それぞれ順に0 Vと-1.4 Vの電位を加えた時の*in-situ* 反射率測定から得られた $\rho(\Sigma b_i)$ プロファイルと比較する。これから酸化層全体の厚みに大きな変化は見られないが、 $\rho(\Sigma b_i)$ は全体に小さくなることがわかった。また酸化層中では、還元反応の進行に伴い-OH 水酸基の形成により、NaCl水溶液側の $\rho(\Sigma b_i)$ が低い領域の厚みが増加することが明らかになった。

3.3 偏極中性子による交換バイアス中の磁気モーメントの深さ分布観察¹⁵⁾

中性子反射率法の大きな特長の1つである、偏極中性子による磁性薄膜中の磁気モーメントの空間分布の観測に関する

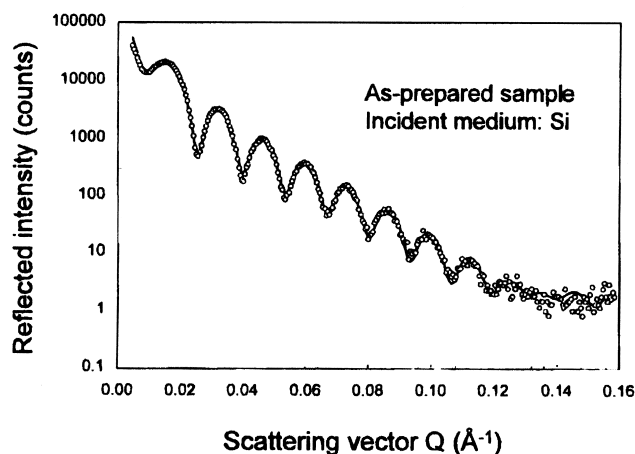


図6 シリコン基板中を透過して観測されたTi薄膜の反射中性子強度プロファイル
(図中の実線はモデル解析により得られた計算値を表す。)
Reprinted with permission from Z. Tun et al¹⁴⁾.
Copyright 1999, The Electrochemical Society.

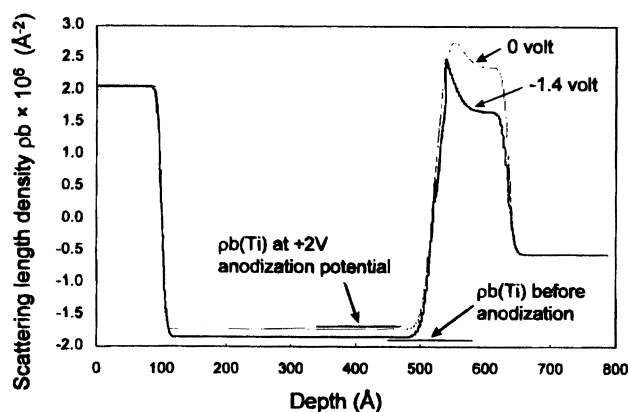


図7 酸化反応後のTi薄膜に0および-1.4Vの電位を加えた時に得られた試料深さ方向の散乱長密度分布 $\rho(\Sigma b_i)$ の比較
Reprinted with permission from Z. Tun et al¹⁴⁾.
Copyright 1999, The Electrochemical Society.

研究例を紹介する。中性子がスピンを有する性質を利用し、偏極子 (Polarizer) と呼ばれるデバイスにより作り出されるスピンの向きが揃えられた偏極中性子 (Polarized Neutron) が測定に用いられる。試料は、 MgF_2 の単結晶 (10 mm 角) 上に逐次蒸着された強磁性のCo層 (厚み4.1nm) と反強磁性の FeF_2 層 (36.6nm) からなる交換バイアスである。試料の化学的な構造 (層の厚み、界面厚み) についてはX線反射率測定により決定された。試料は FeF_2 の[001]軸方向に印可された438 kA/mの磁場中で10Kまで冷却した後、試料表面に対して垂直な軸の周りで回転させ、磁場と FeF_2 の[110]軸が平行になる条件が作り出された。図8に偏極中性子反射率プロファイルを示す。試料に印可された磁場の方向に対しスピンの向きがそれぞれ平行 (+)・反平行 (-) の偏極中性子の反射強度を検極子 (Analyzer) と呼ばれるデバイスを用いて偏極解析 (Polarization Analysis) することにより、反射のプロセスで中性子のスピンがフリップしなかった場合 (R^{++} , R^{--}) とフリップした場合 (R^{SF}) で異なる反射率プロファイルが得られた。これら反射率プロファイルのモデル解析により明らかにされた磁気モーメント (3Dの差し込み図)、磁化の大きさ $|M|$ および向き ϕ の試料深さ方向の分布を図9に示す。これによりCo層中では、Co/ FeF_2 界面近傍で磁化の向き ϕ が印可磁場 H に対して $+16^\circ$ 回転している以外は、 H にほぼ平行な方向に磁化が生じていることが明らかになった。一方の FeF_2 層中では、Co/ FeF_2 界面付近では ϕ が -30° を示すのに対し、界面から離れた位置では FeF_2 の[001]軸に平行な方向 ($\phi = -89^\circ$) に磁化した。

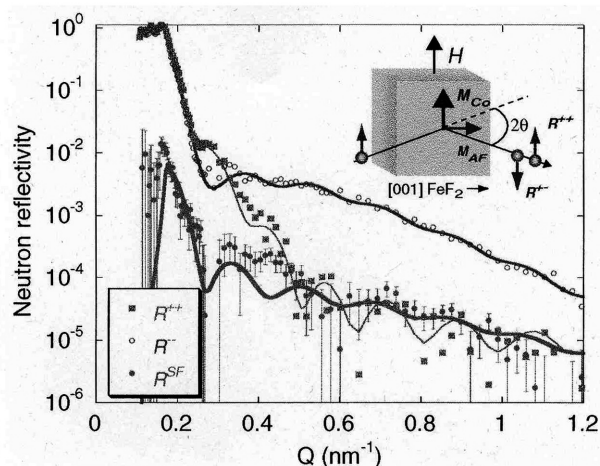


図8 Co/ FeF_2 交換バイアスの偏極中性子反射率プロファイル
(図中の実線は図9に示す試料深さ方向の磁化の分布に基づいて計算された反射プロファイルを表す。)
Reprinted with permission from S. Roy et al¹⁵⁾.
Copyright 2005, The American Physical Society.

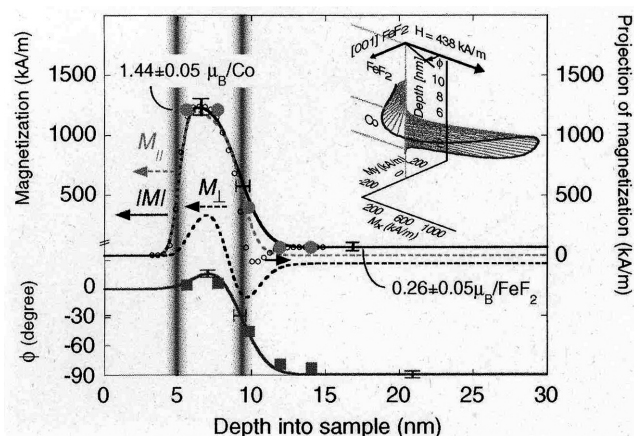


図9 モデル解析により明らかにされた試料深さ方向の磁気モーメント (3Dの差し込み図)、磁化の大きさ $|M|$ および向き ϕ の分布
Reprinted with permission from S. Roy et al.¹⁵⁾ Copyright 2005, The American Physical Society.

4 最後に

本稿では、鉄鋼研究そのものではないが、今後の研究展開を検討する上で参考になり得る埋もれた金属界面を対象に中性子の特徴が活かされた研究例を幾つか紹介し、物質の表面・界面研究に有力な中性子反射率法について概観した。本誌で以前に企画された展望シリーズ「放射光の鉄鋼研究への応用」でも紹介されているように、放射光X線をプローブとする *in-situ* 測定技術を使って鉄鋼の表面状態や界面反応の研究が盛んに行われている¹⁶⁻¹⁹⁾。また、鉄鋼材料のコーティングや塗装等も含めれば、今後、鉄鋼分野において中性子反射率法が活躍できる場が残されている。これまでは中性子の線源強度が小さいために、試料の大きさ等の制約により中性子反射率法を適用できない場合があったと想像する。現在、茨城県東海村で建設が進められている大強度陽子加速器計画 (J-PARC) では、KENSの少なくとも数百倍の入射中性子強度の増加が見込まれている。このJ-PARCにおいてパルス中性子反射率計が実現することで、鉄鋼研究も含めた利用分野が拡大し、中性子反射率法により界面ナノサイエンス・ナノテクノロジーが大きく発展することが期待される。

参考文献

- 1) 例えば, National Institute of Standards and Technology: Home Page of NIST Center for Neutron Research <http://www.ncnr.nist.gov/resources/n-lengths/>
- 2) W. G. Williams: Polarized Neutrons, Clarendon Press, Oxford, (1988)
- 3) 京都大学原子炉実験所: 中性子応用光学ホームページ <http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/neutron/optics/>
- 4) 山崎大, 曾山和彦, 盛合敦, 田村格良, 中村清: 波紋, 日本中性子科学会誌, 16 (2006), 174.
- 5) N. Torikai, M. Furusaka, H. Matsuoka, Y. Matsushita, M. Shibayama, A. Takahara, M. Takeda, S. Tasaki and H. Yamaoka: Appl. Phys. A, Suppl., 74 (2002), S264.
- 6) M. Takeda and Y. Endoh: Physica B, 267-268 (1999), 185.
- 7) 高エネルギー加速器研究機構, 日本原子力研究開発機構: 大強度陽子加速器計画ホームページ <http://j-parc.jp/>
- 8) N. Torikai, H. Matsuoka, K. Soyama, H. Takahashi, M. Takeda, S. Tasaki, D. Yamazaki, T. Ebisawa, T. Sakuma and M. Furusaka: Trans. Mater. Res. Soc. Jpn., 28 (2003), 47.
- 9) D. Yamazaki, K. Soyama, T. Ebisawa, M. Takeda, N. Torikai, S. Tasaki and H. Matsuoka: Physica B, 356 (2005), 229.
- 10) J. Daillant and A. Gibaou: X-Ray and Neutron Reflectivity: Principles and Applications, Springer, New York, (1999)
- 11) T. P. Russell: Mater. Sci. Rep., 5 (1990), 171.
- 12) J. Penfold and R. K. Thomas: J. Phys.: Condens. Matter, 2 (1990), 1369.
- 13) Ch. Rehm, H. Maletta, M. Fieber-Erdmann, E. Holub-Krappe and F. Klose: Phys. Rev. B, 65 (2002), 113404.
- 14) Z. Tun, J. J. Noel and D. W. Shoesmith: J. Electrochem. Soc., 146 (1999), 988.
- 15) S. Roy, M. R. Fitzsimmons, S. Park, M. Dorn, O. Petravic, Igor V. Roshchin, Zhi-Pan Li, X. Batlle, R. Morales, A. Misra, X. Zhang, K. Chesnel, J. B. Kortright, S. K. Sinha and Ivan K. Schuller: Phys. Rev. Lett., 95 (2005), 047201.
- 16) 木村正雄: 放射光, 16 (2003), 12.
- 17) 木村正雄: ふえらむ, 9 (2004), 783.
- 18) 山下正人, 水木純一郎, 小西啓之, 内田仁: ふえらむ, 9 (2004), 699.
- 19) F. U. Renner, A. Stierle, H. Dosch, D. M. Kolb, T.-L. Lee and J. Zegenhagen: Nature, 439 (2006), 707.

(2007年1月15日受付)