

X線光電子分光による12Cr-6Ni-Feおよび12Cr-6Ni-2.5Mo-Fe合金鋼上腐食皮膜の構造解析

Characterization of Corrosion Film on 12Cr-6Ni-Fe and 12Cr-6Ni-2.5Mo-Fe Alloy Steel Using X-ray Photoelectron Spectroscopy

西原克浩* 畑中翔輝 堀籠宏子 神吉恭平
Katsuhiko NISHIHARA Shohki HATANAKA Hiroko HORIGOME Kyohei KANKI

抄 録

12Cr-6Ni-Fe および 12Cr-6Ni-2.5Mo-Fe 合金鋼においては、Mo 添加による腐食皮膜の構造変化によって耐食性が向上することはよく知られている。しかしながら、腐食皮膜の構造に影響を及ぼす Mo 添加効果の詳細は不明だった。本研究の目的は、基材合金への Mo の添加が腐食皮膜の構造に及ぼす影響を明確化させることである。本報においては、軟 X 線 (Al-K α , 1487 eV) と硬 X 線 (放射光, 8000 eV) を用いて測定された光電子分光スペクトルから抽出された光電子放出強度の深さ方向分布から、腐食皮膜の構造に及ぼす Mo 添加効果について議論した結果を紹介する。

Abstract

In 12Cr-6Ni-Fe and 12Cr-6Ni-2.5Mo-Fe alloy steel, corrosion resistance improves through change of the corrosion film by the addition of molybdenum (Mo). However, the effect of the Mo addition and its influence on the corrosion film structure have not been clarified completely. Therefore, the aim of the present research is to clarify the influence that Mo addition to a base material alloy has on the corrosion film structure. This report shows that the effect of Mo addition on the structure of a corrosion film was discussed through the depth direction distribution of photoelectron intensity based on XPS and HAXPES spectra measured using soft X-ray (Al-K α , 1487 eV) and hard X-ray (synchrotron radiation, 8000 eV).

1. 緒 言

近年、世界的なエネルギー需要の拡大、ならびに浅井戸の枯渇に伴い、より深く、より高圧となる深井戸から石油や天然ガスが生産されている(図1)¹⁾。このような油井やガス井は、腐食性の高い硫化水素(H₂S)や炭酸ガス(CO₂)を含んだサワー環境と呼ばれ、鉄鋼材料にとっては非常に厳しい環境となる。そのため、石油や天然ガスの採掘や輸送に用いられる鋼管(油井管: Oil Country Tubular Goods: OCTG)、ならびに輸送に用いられる鋼管(ラインパイプ: Line Pipe: L/P)には、Cr、NiやMoなどの高価な合金元素が多く添加された二相ステンレス鋼(20~30%Cr-4~8%Ni-2~4%Mo鋼)やNi合金(19~30%Cr-25~60%Ni-2~14%Mo)といった高耐食性かつ高強度の高合金が使用されるが、油井やガス井における生産性の効率化や開発費の削

減など経済性も求められている¹⁻³⁾。

日本製鉄(株)ではCO₂、Cl⁻およびH₂Sを含む環境で使用できるステンレス鋼を製品化している。従来、炭酸ガスを含む油井管環境においては、マルテンサイト系ステンレス13Cr鋼が使用されていたが、微量の硫化水素を含む環境になると硫化物応力割れ(Sulfide Stress Cracking: SSC)が問題となった。この問題を解決するため、母材合金へMo添加することにより、耐SSC性の向上したスーパー13Cr鋼が開発された⁴⁾。さらに、油井管用に開発されたスーパー13Cr鋼を低C化して溶接性を確保することによって、経済性の優れたラインパイプ用スーパー13Cr鋼(13CrS)が開発、実用化された^{5,6)}。この時、Mo添加によって耐SSC性が向上したスーパー13Cr鋼においては、Mo添加によって、鋼材上に生成される皮膜(自然酸化膜、不動態皮膜や腐食皮膜など)が、腐食環境に曝されても安定して存

* 先端技術研究所 解析科学研究部 材料構造解析研究室 主幹研究員 博士(工学) 兵庫県尼崎市扶桑町1-8 〒660-0891

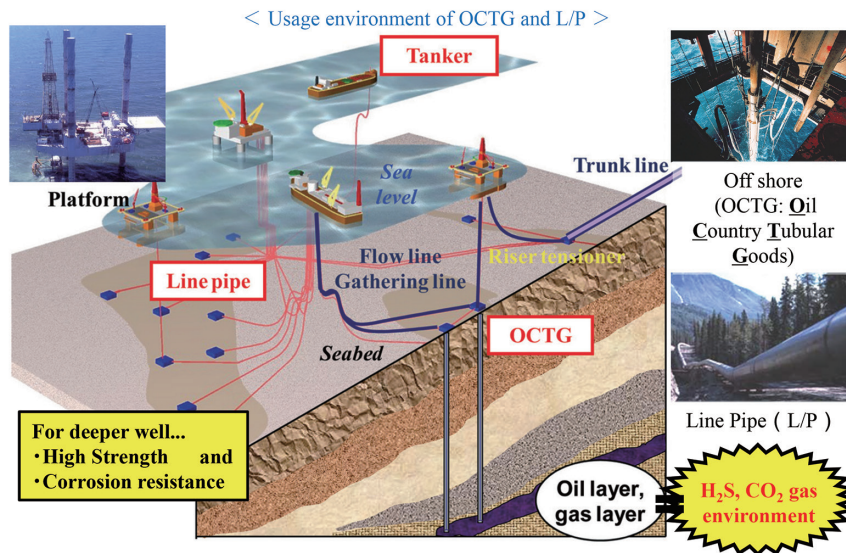


図1 過酷な油井/ガス井環境下における採掘(油井管)と輸送(ラインパイプ)¹⁾
Production and transportation in a severe oil and natural gas well environment¹⁾

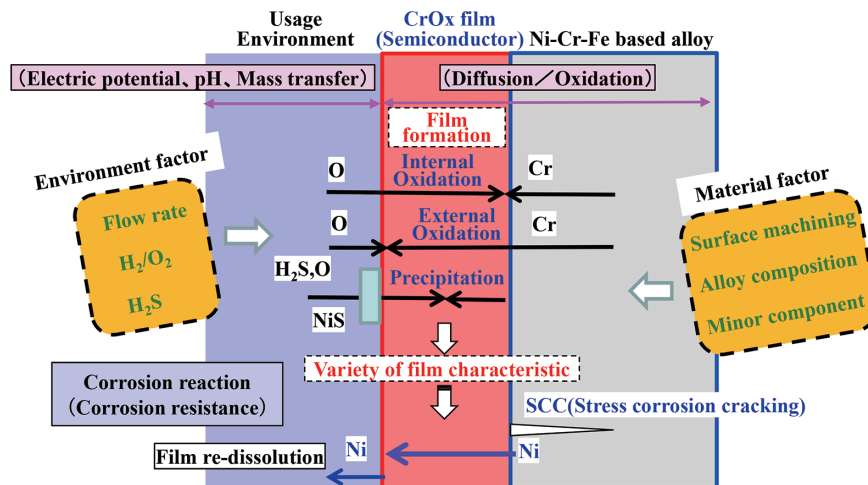


図2 Ni-Cr-Fe 合金鋼の腐食反応機構⁷⁾
Corrosion reaction on Ni-Cr-Fe based alloy steel in usage environment⁷⁾

在することによって、耐SSC性が向上したと考えられているが、詳細は不明だった。

一般に、酸素を含む腐食環境下に曝されたステンレス鋼(Ni-Cr-Fe系合金)においては、2種類の腐食反応機構によって、鋼材上にCr酸化物(CrOx膜)が生成されると考えられてきた。1つは、アノード反応によって母材合金から溶出したCrイオンが、腐食環境に向かって外方拡散して皮膜表面における腐食反応が進行する外方拡散機構であり、もう1つは、カソード反応によって腐食環境中に生成されたOイオンが、皮膜表面からCrOx膜/基材合金界面に内方拡散してCrOx膜/母材合金界面の腐食反応が進行する内方拡散機構である(図2)⁷⁾。そのため、ステンレス鋼上に生成されたCrOx膜の膜厚、構造、結晶性、元素組成や化学結合状態などの深さ方向分布や面内方向変化を調査することによって、CrOx膜が生成された腐食環境下におけ

るステンレス鋼の腐食反応機構を推定することができる。

本報は、軟X線(ラボ光源: Al-K α /1487eV)ならびに硬X線(放射光: 約8keV)を用いた光電子分光により、腐食試験後の12Cr-6Ni-Fe合金鋼および12Cr-6Ni-2.5Mo-Fe合金鋼上に生成された腐食皮膜の表面から深さ30nm程度までの元素組成や化学結合状態について調査した結果について報告する。

2. 光電子分光を用いた皮膜構造解析

著者らは、鋼材上に生成された酸化膜/腐食皮膜を対象として、深さ方向および面内方向における元素組成や化学結合状態などの構造変化を非破壊分析するため、光電子分光などを適用する評価/分析/解析技術の研究開発に取り組んできた。通常、光電子分光は、真空中に保持された試料に励起光を照射した時、光電効果によって試料の表面か

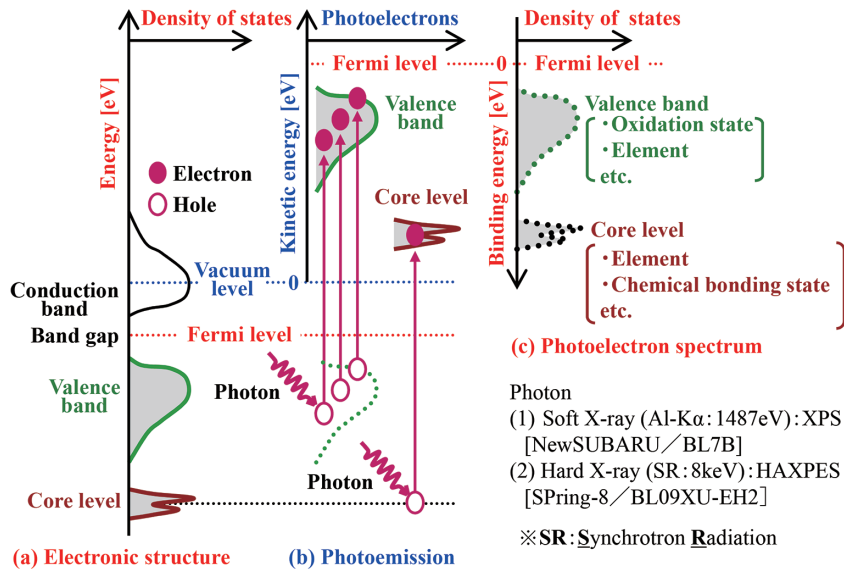
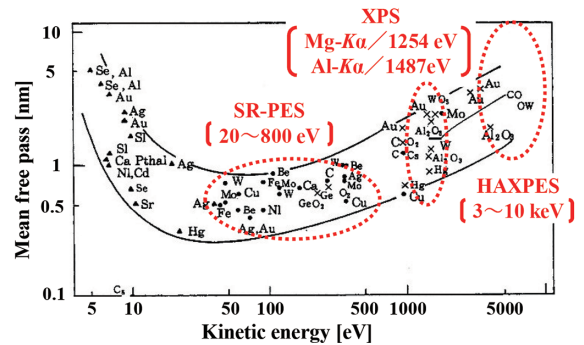


図3 X線光電子分光(XPS, HAXPES)⁷⁾
X-ray photoelectron spectroscopy (XPS and HAXPES)⁷⁾

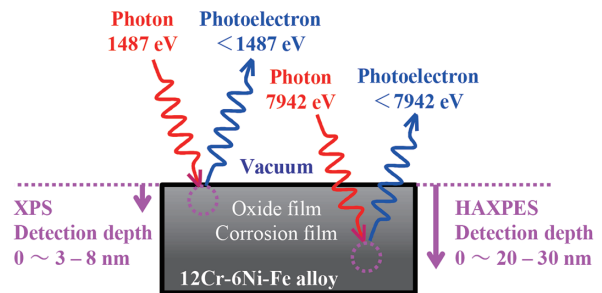
ら真空中に飛び出した光電子を検出して、光電子放出強度の運動エネルギー依存性(光電子スペクトル)を測定する方法である。この時、そして、試料の電子が詰まっている最も高いエネルギー準位であるフェルミ準位を基準として、光電子の運動エネルギーを試料内部における電子の結合エネルギーに換算する。これにより、試料表面の元素組成や化学結合状態を反映した光電子放出強度の結合エネルギー依存性、すなわち光電子スペクトルが得られる(図3)⁷⁾。

この時、光電子分光における検出深さは、光照射によって固体中で励起された電子が、エネルギーを失うことなく固体中を移動して、固体の表面に到達して真空中に放出される距離、すなわち平均自由行程によって決まる。従って、検出される光電子の運動エネルギーが数10eV以上においては、運動エネルギーが大きくなるほど検出深さも大きくなり、励起光に軟X線(Al-Kα: 1487eV)を用いた場合の検出深さは数nm程度、硬X線(放射光: 約8keV)を用いた場合はおよそ20~30nm程度となる(図4)^{7,8)}。

著者らは、皮膜の表面から深さ数nm程度の皮膜表層における化学結合状態の深さ方向分布については、軟X線(ラポ光源: Al-Kα/1487eV, Mg-Kα/1254eV)を用いた光電子分光(X-ray Photoelectron Spectroscopy: XPS)などを用いた非破壊分析を行った^{9,10)}。一方、表面から埋もれた皮膜/鋼材界面近傍に至る皮膜全体における化学結合状態の深さ方向変化については、従来、FIB加工と断面TEM観察、あるいはAr⁺スパッタリングと表面分析を組み合わせた破壊分析しか方法がなく、化学結合状態を非破壊分析する有効な方法がなかった。そこで、著者らは、検出深さが20~30nm程度となる硬X線(放射光: 約8keV)を励起光に用いた硬X線光電子分光(Hard X-ray Photoelectron Spectroscopy: HAXPES)を用いて、鋼材上に生成された腐食皮膜の表面



(a) Mean free pass of electron in material⁸⁾



(b) Detection depth of XPS and HAXPES⁷⁾

図4 光電子分光の検出深さ(電子の物質中平均自由行程)^{7,8)}
Detection depth of photoelectron spectroscopy (mean free pass of electron in material)^{7,8)}

から埋もれた皮膜/鋼材界面近傍に至る元素組成や化学結合状態に関する深さ方向分布の非破壊分析を試みた¹¹⁻¹⁶⁾。

3. 実験

本実験に用いた供試材(12Cr-6Ni-Fe合金鋼, 12Cr-6Ni-2.5Mo-Fe合金鋼)の化学組成を示す(表1)。厚さ2mmの供試材はそれぞれ10mm角に切断して、片面(測定面)の

みを鏡面研磨した。そして、油井やガス井などのサワー環境を模擬した腐食液 (pH4.0, 10%NaCl水溶液, 10% H_2S+CO_2 ガス飽和) に2時間ならびに24時間浸漬した。

まず、12Cr-6Ni-Feおよび12Cr-6Ni-2.5Mo-Feに生成された酸化膜/腐食皮膜について、軟X線を用いたXPSスペクトルを測定した。実験は、兵庫県立大学/高度産業科学技術研究所の放射光施設NewSUBARU/BL7Bに常設された光電子分光装置(超高真空仕様, ラボ光源: Al-K α /1487eV, VG Scienta製XPS装置R3000)を用いた。XPSスペクトル測定においては、試料の表面に対して45°傾斜した方向から軟X線を照射して、同じく45°傾斜した方向の真空中に放出された光電子を検出した。また、試料に照射した軟X線の試料表面におけるビーム径は約3mmだった。

次に、硬X線を用いた角度分解/HAXPESスペクトルを測定した。実験は、SPring-8/BL09XU-EH2に設置された3次元空間分解HAXPES装置を用いた。そして、皮膜の表面近傍から埋もれた皮膜/母材合金近傍に至るまでの元素組成や化学結合状態の深さ方向変化が反映される角度分解/HAXPESスペクトルを測定した¹⁴⁻¹⁶⁾。本実験においては、ビームサイズが11 μ m(H) \times 2 μ m(V)に集光された硬X線(放射光: 7.94keV)を照射して、表面に対して検出角35° \pm 32°の方向に放出された光電子を広角対物レンズ/静電半球型電子エネルギー分析器/2次元検出器(MCP)で検出した。従来の角度分解測定においては、試料を回転させて、試料に照射するX線の入射角(試料から放出される光電子の検出角)ごとに測定するため、多くの時間が必要

だった。一方、今回の角度分散測定においては、1回の測定により、光電子放出強度の2次元分布像(縦軸: 検出角/23°~87°/225分割, 横軸: 運動エネルギー/任意)が得られるため、従来の角度分解測定に比べて、約1/10以下の短時間で、皮膜の元素組成や化学結合状態に関する深さ方向分布を非破壊分析できる(図5)¹⁴⁻¹⁶⁾。

4. 結 果

4.1 軟X線光電子分光を用いた鋼材上皮膜の構造解析

軟X線(ラボ光源: Al-K α /1487eV)を用いたX線光電子分光により、鋼材上に生成された皮膜の表面から深さ数nm程度までにおける腐食進行に伴う平均的な化学結合状態変化を調査した。通常、ステンレス鋼などのNi-Cr-Fe合金鋼が、酸素を含む環境中に曝露されると、鋼材表面には、Cr酸化物およびFe酸化物を主成分とする複合酸化膜が形成される。そこで、X線光電子分光において、Cr酸化物に帰属されるCr 2 $p_{3/2}$ ピークとFe酸化物に帰属されるFe 2 $p_{3/2}$ ピークの相対的なピーク強度比から、鋼材上に形成された複合酸化膜におけるCr酸化物とFe酸化物の構成比率を推定した。その結果、皮膜を構成するCr酸化物に帰属されるCr 2 $p_{3/2}$ ピークとFe酸化物に帰属されるFe 2 $p_{3/2}$ ピークの相対強度比、すなわちCr 2 $p_{3/2}$ /(Cr 2 $p_{3/2}$ +Fe 2 $p_{3/2}$)が、母材合金にMo添加されていない鋼材に比べて、Mo添加した鋼材が大きく、皮膜を構成するCrOx成分比率が大きくなった(図6, 7)¹⁰⁾。

図7において、常温常圧大気中に放置された腐食試験前の自然酸化膜は約0.1であり、サワー環境模擬腐食液(pH4.0, 10%NaCl水溶液, 10% H_2S+CO_2 ガス飽和)に24時間浸漬後の腐食皮膜は約0.4となり、Mo添加の有無による違いはほとんどなかった。一方、2時間浸漬後の腐食皮膜は、Mo無添加の場合が0.1程度だったのに対して、Moが添加された場合は0.4以上となった。このことから、サワー

表1 供試材の化学組成
Chemical composition of lab melted test specimens

Mark	C	Ni	Cr	Mo	Fe
12Cr-6Ni-Fe	0.01	6.0	12.0	<0.01	balanced
12Cr-6Ni-2.5Mo-Fe	0.01	6.0	12.0	2.5	balanced

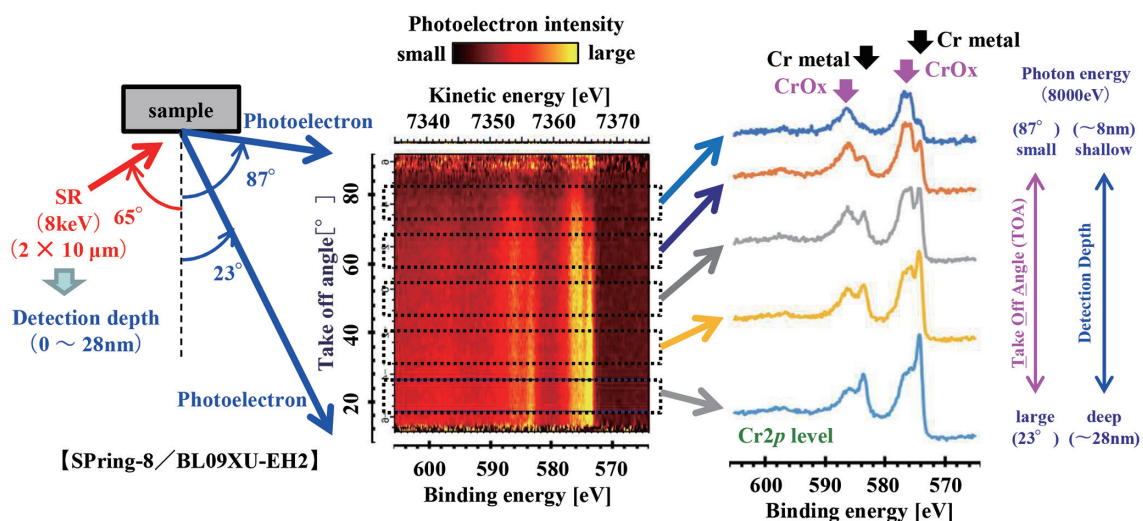


図5 角度分散/硬X線光電子分光¹⁴⁻¹⁶⁾
Angle-resolved hard X-ray photoelectron spectroscopy¹⁴⁻¹⁶⁾

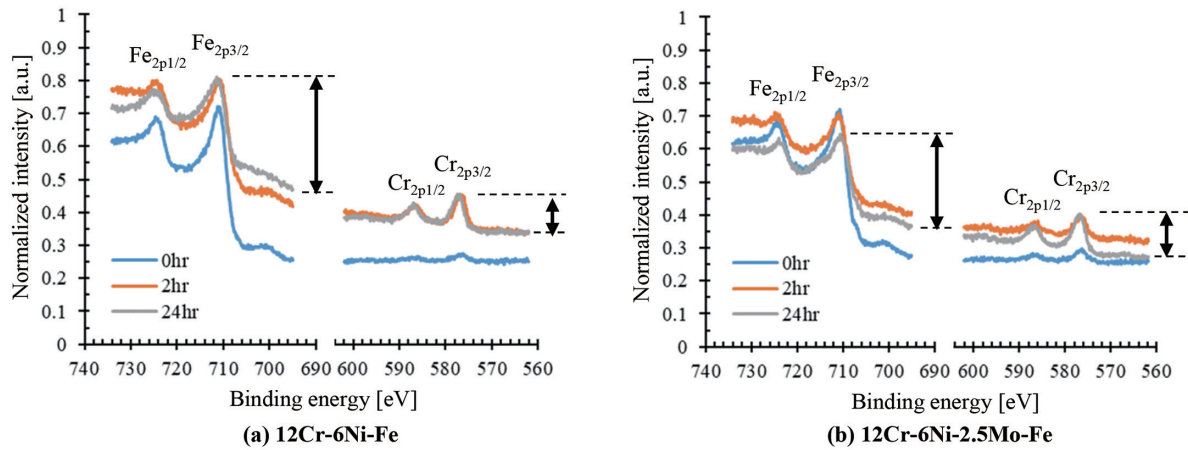


図6 12Cr-6Ni-Fe/12Cr-6Ni-2.5Mo-FeのXPSスペクトル¹⁰⁾
Change in XPS spectra of 12Cr-6Ni-Fe and 12Cr-6Ni-2.5Mo-Fe with immersion time¹⁰⁾

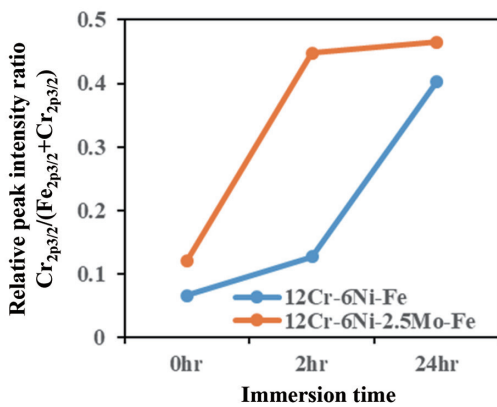


図7 12Cr-6Ni-Fe/12Cr-6Ni-2.5Mo-Feの相対ピーク強度比¹⁰⁾
Change in relative peak intensity ratio of 12Cr-6Ni-Fe and 12Cr-6Ni-2.5Mo-Fe with immersion time¹⁰⁾

環境模擬腐食液に浸漬された腐食初期においては、母材合金にMoが添加されると、母材合金上におけるCrOxの生成が促進されることによって、耐食性が向上したと考えられる。

4.2 硬X線光電子分光を用いた鋼材上皮膜の構造解析

12Cr-6Ni-Feおよび12Cr-6Ni-2.5Mo-Feの角度分散/HAXPES測定によって、光電子放出強度の結合エネルギー依存性ならびに検出角(検出深さ)依存性を2次元分布像として測定した。そして、光電子の検出角、すなわち深さ方向に5分割したHAXPESスペクトルを抽出した(図8)¹⁰⁾。

まず、12Cr-6Ni-FeのFe 2p_{1/2}およびFe 2p_{3/2}ピーク形状に着目すると、腐食皮膜の表面から母材界面近傍の深部に至る皮膜全体においてFeは酸化物FeOxとして存在すること、ならびに深部になるほど金属Feに帰属されるピークが顕在化することが確認された。また、同じく母材に起因するCr 2p_{1/2}およびCr 2p_{3/2}ピークの形状からは、腐食皮膜全体にわたってCrが全て酸化物CrOxとして存在すること

が確認され、腐食皮膜の表層から深部になるほどピーク強度は大きくなった。一方、腐食環境中に存在するSおよびOに起因するS 1sおよびO 1sピークは、腐食皮膜の表層においてピーク強度が最大となり、深部になるほど小さくなった。そして、S 1sピークの形状から、ほとんどのSが硫化物であり、微量の硫酸塩SOxが存在することが確認された。また、O 1sピークには530eVと532eV付近に2つのピーク成分があり、腐食皮膜の表層は530eV付近、深部は532eV付近のピーク強度が、それぞれ相対的に大きくなることを確認された。さらに、C 1sピークにおいては、汚染Cと炭酸塩CO₃²⁻にそれぞれ帰属される2つのピークが検出され、これらのピーク強度は、腐食皮膜の表層が最小であり、深部になるほど大きくなった(図8(a))¹⁰⁾。

次に、12Cr-6Ni-2.5Mo-Feの母材合金に起因するFe 2p_{1/2}およびFe 2p_{3/2}ピークに着目すると、Feは腐食皮膜の表層においてのみ酸化物FeOxが金属Feよりも多く存在した。そして、腐食皮膜の内部においては、深部になるほど金属Feに起因するピークが酸化物FeOxに帰属されるピークよりも相対的に強度が大きくなると共に、Fe 2p準位全体のピーク強度も大きくなった。また、同じくCr 2p_{1/2}およびCr 2p_{3/2}ピークにおいては、表層においてピーク強度が最小であり、深部になるほど大きくなった。そして、ピーク形状から、皮膜の表層においては酸化物CrOxが金属Crよりも支配的だったが、皮膜の内部になると、金属Crとして存在する割合が高くなることを確認された。一方、腐食環境に起因するS 1s、O 1sおよびC 1sピークは、いずれも腐食皮膜の表層においてピーク強度が最大であり、深部になるほど小さくなった。そして、S 1sおよびC 1sピークから、腐食皮膜全体にわたって、Sは硫化物、Cは汚染Cとして存在することが確認された。また、O 1sピークは、12Cr-6Ni-Fe合金の場合と同様、530eVと532eV付近に2つのピーク成分が存在するが、腐食皮膜全体にわたって、530eV付近が、532eV付近のピーク強度よりも大きく、支配的な酸

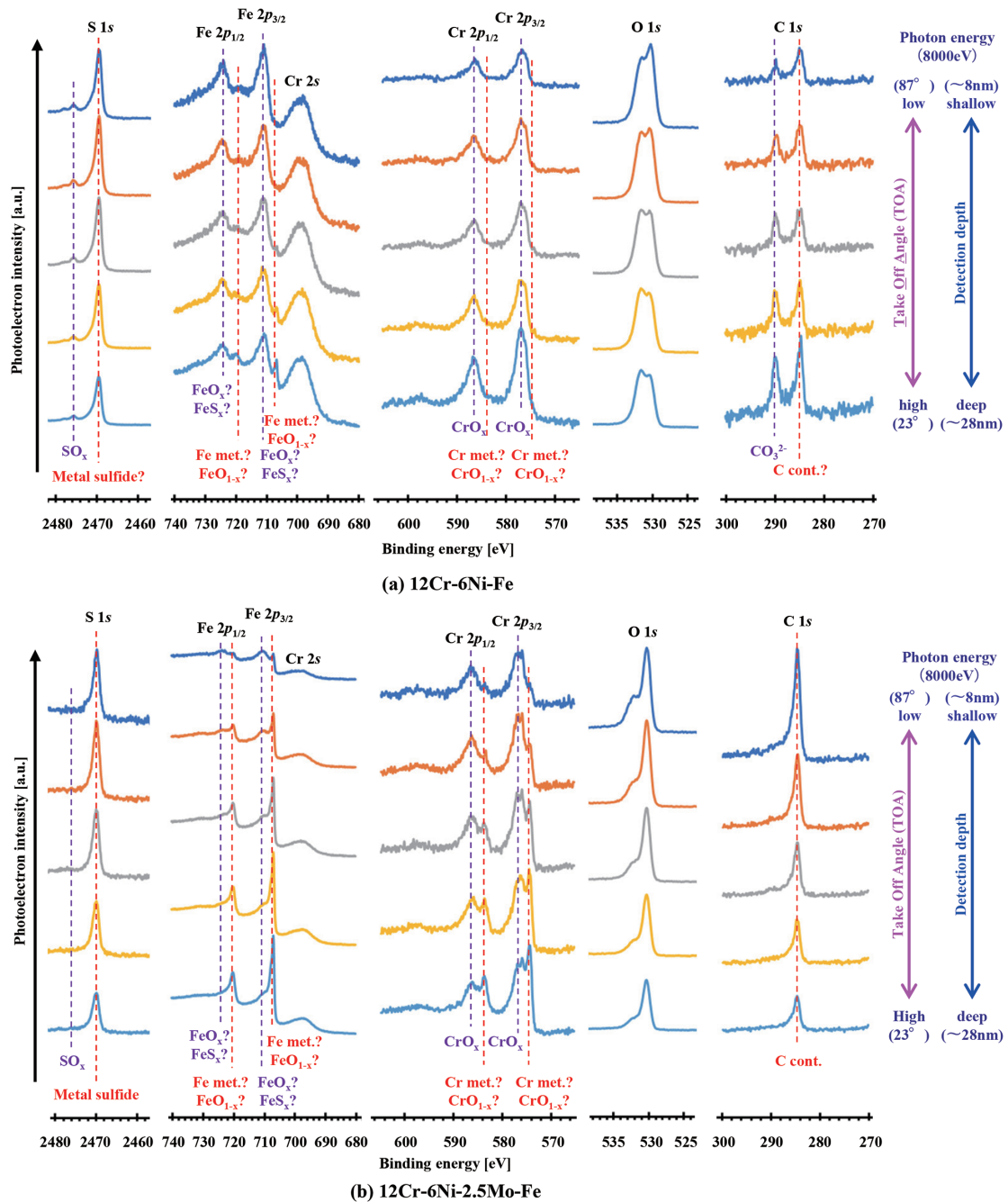


図 8 12Cr-6Ni-Fe/12Cr-6Ni-2.5Mo-Fe の HAXPES スペクトル¹⁶⁾
Change in HAXPES spectra of 12Cr-6Ni-Fe and 12Cr-6Ni-2.5Mo-Fe with take off angle¹⁶⁾

化物状態であることが確認された (図 8 (b))¹⁶⁾。

また、母材に起因する Mo 3p_{1/2} および Mo 3p_{3/2} ピークは、Fe や Cr 同様、表層においてピーク強度が最小であり、深部になるほど大きくなった。そして、ピークの形状から、表層においては硫化物 MoS_x や酸化物 CrO_x が金属 Mo よりも支配的だったが、深部になると、金属 Mo として存在する割合が高くなることが確認された (図 9)¹⁶⁾。

次に、母材合金元素に帰属される内殻準位 (Fe 2p, Cr 2p, Mo 3p)、ならびに腐食環境中元素に帰属される内殻準位 (S 1s, C 1s, O 1s) のピーク強度を算出して、最大値が 1 となるように規格化を行い、深さ方向における相対的なピーク

ク強度変化を調査した。この時、各内殻準位のピーク強度は、金属、酸化物など全ての化学結合状態を含んだ面積強度とした (図 10)¹⁶⁾。

母材合金の基本組成である 12Cr-6Ni-Fe においては、Fe 2p, O 1s ピーク強度が、腐食皮膜の表面から深部になるほど連続的に小さくなった。その一方で、Cr 2p, C 1s ピーク強度は、腐食皮膜の表層が最も小さく、深部になるほど大きくなる傾向を示すと共に、腐食皮膜の中層領域にピーク強度の増加傾向が小さくなる領域が存在した。また、S 1s ピーク強度は、腐食皮膜の表層から深くなるにつれて、一度、大きくなった後、小さくなる傾向を示し、腐食皮膜の中層

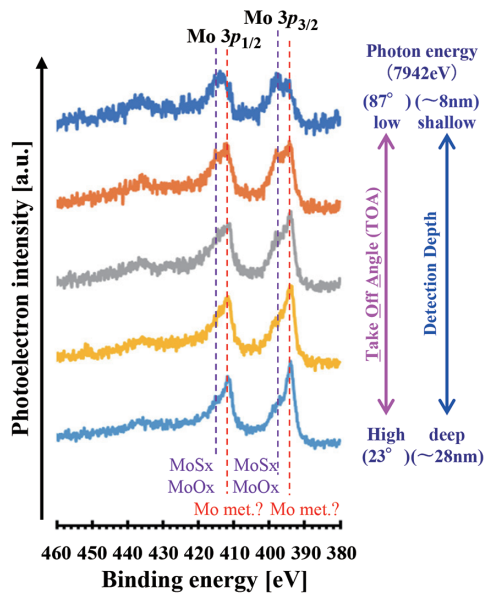


図9 12Cr-6Ni-2.5Mo-FeのMo 3pスペクトル¹⁶⁾
Change in Mo 3p spectrum of 12Cr-6Ni-2.5Mo-Fe with take off angle¹⁶⁾

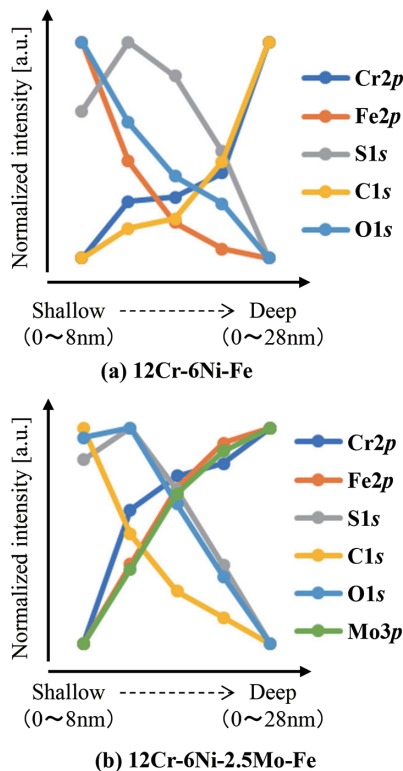


図10 12Cr-6Ni-Fe/12Cr-6Ni-2.5Mo-Feの内殻準位ピーク強度¹⁶⁾

Depth direction distribution of photoelectron intensity in HAXPES spectra of 12Cr-6Ni-Fe and 12Cr-6Ni-2.5Mo-Fe¹⁶⁾

にピーク強度の変化が小さくなる領域が存在することが確認された(図10(a))¹⁶⁾。これに対して、12Cr-6Ni-2.5Mo-Feは、Fe 2pならびにCr 2pピーク強度は、腐食皮膜の表面から深部になるほど、どちらも大きくなる傾向を示した(図10(b))¹⁶⁾。また、C 1sピークは、12Cr-6Ni-Fe合金においては、

腐食皮膜の表層から深くなるほど大きくなったが、12Cr-6Ni-2.5Mo-Feは、腐食皮膜の表層に近いほど大きくなる逆の傾向を示した。母材合金にMoが添加されると、CO₃²⁻ならびにFeOxやCrOxを有する腐食皮膜の生成が抑制されて、母材合金に起因する金属Feや金属Crに起因するピーク成分が顕著となり、母材合金の腐食反応が抑制されていると推定される結果が得られた。

5. 結 言

12Cr-6Ni-Feおよび12Cr-6Ni-2.5Mo-Fe上に生成された腐食皮膜について、軟X線(ラボ光源: Al-Kα/1487eV)を用いた光電子分光(XPS)、ならびに硬X線(放射光: 約8keV)を用いた角度分散/硬X線光電子分光(HAXPES)を用いて、腐食皮膜の元素組成や化学結合状態を測定した。その結果、XPSスペクトル(検出深さ: 表面から深さ数nm程度)において、FeOxに帰属されるFe 2p_{3/2}ピークおよびCrOxに帰属されるCr 2p_{3/2}ピークの相対強度比Cr 2p_{3/2}/(Cr 2p_{3/2}+Fe 2p_{3/2})が、腐食進行によって大きくなると共に、母材合金にMo添加すると、Mo添加しない場合よりも大きくなることが確認された。また、HAXPESスペクトルの深さ方向変化から、腐食皮膜の表面から深さ30nm程度までの母材合金界面近傍に至る化学結合状態の深さ方向分布が明らかとなり、母材合金の元素組成が、腐食皮膜を構成するFe、CrやMoなど無機化合物(CrOx, FeOx, FeS, MoOxやMoSxなど)の深さ方向分布に影響を及ぼすことを示唆する結果が得られた。

謝 辞

日本製鉄は、兵庫県立大学/高度産業科学技術研究所の春山雄一准教授に多大なご協力とご支援を頂き、兵庫県立大学・放射光施設(NewSUBARU/BL7B)における共同研究を実施しており、心からの感謝の意を表します。

また、大阪公立大学の三村功次郎教授および学生の皆様、ならびに高輝度光科学研究センター(JASRI)の保井晃氏には、大型放射光施設(SPring-8/BL09XU-EH2)における角度分散/硬X線光電子分光測定に関する多大なご協力とご支援を頂き、本研究を実施することができました。この場を借りて、心から御礼申し上げます。

参照文献

- 1) 相良雅之 ほか: 新日鉄住金技報. (397), 58 (2013)
- 2) 高部秀樹 ほか: 新日鉄住金技報. (397), 23 (2013)
- 3) 大村朋彦 ほか: 新日鉄住金技報. (397), 17 (2013)
- 4) Ueda, M. et al.: Corrosion/92. Paper No.55, NACE International, 1992
- 5) Ueda, M. et al.: Proceedings of Eurocorr/96. Session VII, 1996
- 6) Miyata, Y. et al.: Kawasaki Steel Technical Report. (38), 53 (1998)
- 7) 西原克浩: 化学工学. 86 (8), 391 (2022)

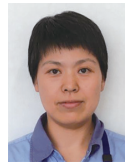
- 8) Brundle, C. R.: J. Vac. Sci. Technol. 11, 212 (1974)
- 9) 山瑞拓路 ほか：表面科学. 37 (4), 150 (2016)
- 10) Kanki, K. et al.: Corrosion, 79 (5), 570 (2023)
- 11) 土井教史 ほか：SPring-8/SACLA 利用研究成果集 B. 5 (1), 97 (2017)
- 12) Cho-ying Lin et al.: SPring-8/SACLA 利用研究成果集 A. 6 (2), 190 (2018)
- 13) 吉木昌彦 ほか：SPring-8/SACLA 利用研究成果集 A. 8 (2), 432 (2020)
- 14) 高木康多 ほか：SPring-8/SACLA 利用研究成果集 A. 10 (4), 365 (2022)
- 15) Ikenaga, E. et al.: J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. 190, 180 (2013)
- 16) 西原克浩 ほか：令和3年度 SPring-8 一般課題（産業分野）実施報告書 (2021B), https://support.spring8.or.jp/report/Report_JSJ/JsJ_2021B.html



西原克浩 Katsuhiro NISHIHARA
先端技術研究所 解析科学研究部
材料構造解析研究室 主幹研究員
博士(工学)
兵庫県尼崎市扶桑町1-8 〒660-0891



畑中翔輝 Shohki HATANAKA
技術開発企画部 尼崎研究支援室



堀籠宏子 Hiroko Horigome
技術開発企画部 尼崎研究支援室



神吉恭平 Kyohei KANKI
関西技術研究部 鋼材研究室 主任研究員