

連携記事

SIPプログラムにおける耐食鉄筋および コンクリート内部センシング技術の開発

Development of the Corrosion Resistant Steel and Sensing Method in Concrete Under SIP Program

西村俊弥

Toshiyasu Nishimura

物質・材料研究機構

構造材料研究拠点

耐食鋼グループ グループリーダー

1 はじめに

近年、インフラ用コンクリート構造体の経年劣化が社会問題となっている。特に、海岸地域や凍結防止剤を散布する地域では、劣化状態が激しい。これは、塩分がコンクリートを透過し、内部の鉄筋が腐食して、さびの体積膨張でコンクリートが破壊するためである。さらに、最近では、中性化や酸性雨の影響も問題となっており、コンクリート鉄筋の腐食は深刻となっている。そこで、SIP (戦略イノベーション創造プログラム) プロジェクトにおける「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」では、コンクリート構造体の劣化について、種々の予測技術や対策について検討が進められている¹⁾。

一般に、鉄筋の腐食を防ぐためには、耐食性の高い鉄筋を用いることが有効である。既に、ステンレス鉄筋が提案されているが²⁵⁾、価格が非常に高く、あまり使用されていない。また、エポキシ塗装鉄筋⁶⁾では、施工時に塗膜が破壊されることが指摘されている。このため、安価で耐食性や施工性に優れた鉄筋が強く要望されている。

一方、コンクリート中の鉄筋の腐食を予測したり、耐食鉄筋を開発するためには、まず、コンクリート内部の環境を把握する必要がある。特に、コンクリート内部環境において、鉄筋の腐食性因子である塩分やpHを観測することが重要となる。しかし、これまでにおいては、腐食性因子を正確に測定する技術の検討が十分ではなかった。そこで、本研究では、まず、コンクリート内部の塩分やpHを測定可能なセンサーを開発した^{7,8)}。次に、炭素鋼鉄筋が腐食している場合について、コンクリート内部環境を正確にセンシングすることを達成した。その結果から模擬溶液を作製して、鉄筋の腐食に与える合金成分の影響を電気化学特性評価により解析して耐食

組成を決定することを試みた⁹⁾。

2 コンクリート内部環境のセンシング

鉄鋼材料の腐食劣化対策を行うためには、腐食環境を把握する必要があるが、コンクリートの場合では、内部の鉄筋近傍の環境を理解する必要がある。このため、本研究では、マイクロセンサーを独自に開発して、コンクリート内部の腐食性因子である塩分とpHを定量的にセンシングする技術を確立した。図1にセンサーを用いたコンクリート内部環境因子の測定状況を示す。コンクリートに細孔(ピット)を作製して、そこに塩分およびpHセンサーを挿入して内部の環境をセンシングする。図2は、各実験項目と試験条件を纏めたものである。コンクリートブロックは、普通ポルトランドセメントで作成し、(水/セメント)比を0.6とし、水には、0.3 mass % NaClを用いた。塩分センサーは、銀/塩化銀 (Ag/

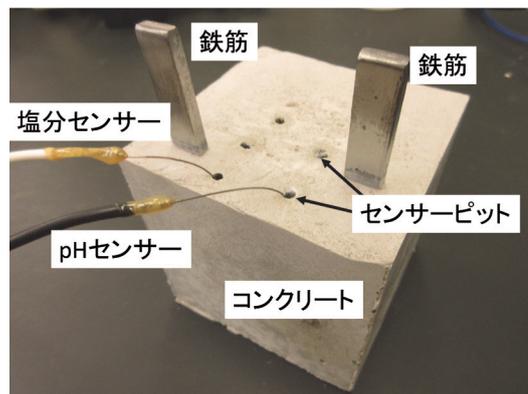


図1 センサーを用いたコンクリート内部環境因子の測定状況

AgCl) マイクロ電極であり、また、pH センサーは、タングステン/同酸化物 (W/WOx) マイクロ電極である^{7,8)}。いずれも図2の条件で作成し、それぞれ、塩分濃度、pHを変化させた溶液を用いてキャリブレーションカーブを作製した。鉄筋の腐食は、電気化学インピーダンス法 (EIS) を用いて^{7,8)}、図2の条件で測定し、腐食抵抗値によって耐食性を評価した。

腐食環境としては、海や凍結防止剤からくる塩分による塩害、そして、大気中の炭酸ガスによる中性化を把握する必要がある。特に、塩害と中性化が同時に起こるような厳しい環境でも腐食劣化しない耐食鉄筋が求められる。中性化では、広くコンクリートのpH低下を指すが、例えば酸性雨が降る場合では、pHが最低4.0になる場合もある。そこで、3% NaCl溶液 (pH=4.0) に浸漬したコンクリートブロックについて内部の塩分およびpHを図1及び図2の条件でセンシングした。図3がその結果であり、コンクリートのかぶり位置が10, 20 mmにおける塩分およびpHの連続変化を示す。試験時間が増加すると、塩分濃度は増加し、また、pHは減少していく状態が見られる。厳密には、pHの低下はやや緩慢であり、これは、コンクリートのpH緩衝性に起因する。一方、塩分濃度は、時間とともに増加し、内部への塩分の浸透が進む状況が把握できる。また、かぶり20mmに比較して、10mmの位置の方が塩分濃度が高く、かぶり厚さにより環境が異なることが示される。このように、コンクリート内部の塩分およびpHをセンシングする技術を確立した。

3 耐食鋼の耐食指針把握

コンクリート内部の塩分が増加し、また、pHが下がる環境についてセンシングが可能となったので、この知見を利用して耐食鋼の耐食指針を把握する。具体的には、コンクリート内部溶液について模擬溶液を作製して、合金成分を添加した合金鋼 (耐食鋼) の模擬溶液中でのEIS特性を評価する⁹⁾。図4は、耐食鋼 (CR1: 7% Cr添加鋼) および炭素鋼 (SM) の腐

1. コンクリートブロック: ポートランドセメント (水/セメント)比=0.6, 水: 0.3 mass% NaCl
2. 塩分センサー: Ag/AgCl マイクロ電極 0.3mm Ag wire, 500 mV 20 min 0.1 M HCl
3. pH センサー: W/WOx マイクロ電極 0.3mm W wire, 18 h 10% HNO ₃
4. 腐食モニタリング: 電気化学インピーダンス法 (EIS) 0.3mHz ~ 20kHz, 3極式

図2 実験項目と条件

食抵抗 (Z) の変化を示したものである。まず、ライン1 (SM ac) は、図3における実際の環境での炭素鋼の腐食抵抗 (Z) の変化である。SMのZは、試験時間 (日) とともに低下していき、これは、腐食が進行していく状況を示す。このとき、各試験時間 (日) におけるコンクリート内部の塩分濃度およびpHは、図3のように得られている。そこで、各試験時間 (日) における塩分濃度とpHを模擬した溶液を作製し、その中でSMのZを求めたものがライン2 (SM sim) である。ライン1とライン2のZの値は、概ね同じ値を示している。つまり、コンクリート内部の腐食性因子において、塩分とpHが主たる要因であることが示された。さらに、この模擬溶液を用いて、合金元素の影響を確認した。コンクリート中で鉄筋の腐食が進行するのは、表面の不働態皮膜が破壊するためであり、この不働態化を促進する元素としてまず、クロム (Cr) に着目した。図4におけるライン3 (CR1 sim) は、7% Cr添加鋼 (CR1) の模擬溶液中でのZ値の結果である。各Zの結果は、模擬した日の位置にプロットしてある。CR1のZは非常に高い値を示し、また、試験時間が経過しても低下しないことが分かる。7% Cr添加鋼 (CR1) が有効である知見が得られたので、実際にCR1をコンクリートに埋め込んで、鉄筋として腐食抵抗を求めたものがライン4 (CR ac) である。模擬環境でのライン3に比較して、若干ライン4のZが低い値となっているが、これは、実環境に曝されている時間が圧倒的に長いためである。しかし、炭素鋼の結果であるライン1および2に比較して、CR1のZは、非常に高く、7% Crを添加した鋼では、過酷な環境で高い耐食性を有することが示唆された。

橋梁の上部構造では、雨の日に濡れ、晴れの日に渴くという乾湿繰り返し環境に曝される。この時に鉄筋表面に形成される鉄さびによりコンクリートの破壊が生じるため、割れ性

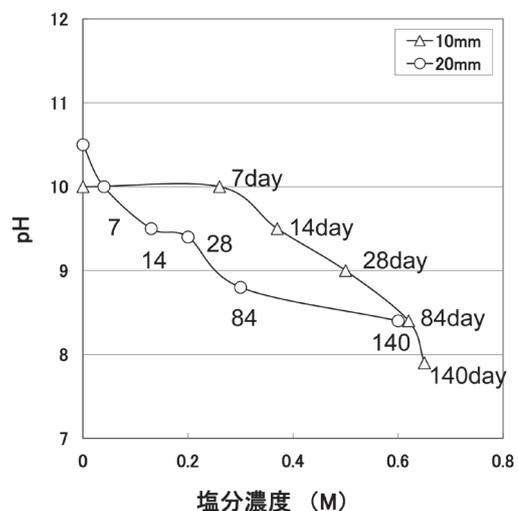


図3 3% NaCl溶液 (pH=4.0) に浸漬したコンクリートブロック内の塩分およびpHの連続変化 (かぶり: 10, 20 mm)

の評価では、このような環境下での腐食を検討する必要がある。図5は、乾湿繰り返し試験を行い、2年後のコンクリートブロックの状態である¹⁰⁾。1週間における試験条件は、[湿润(3% NaCl) 3日+乾燥(25℃、50% RH) 4日]である。炭素鋼鉄筋を用いた場合は、腐食が激しく、コンクリートに割れが生じている。一方、耐食鋼CR1を用いた場合は、腐食が軽微であり、コンクリートも健全である。

図6は、乾湿繰り返し試験におけるコンクリート内部の耐食鋼(CR1, CR2)および炭素鋼(SM)のさび抵抗(R rust)と腐食抵抗(Rt)の経時変化を纏めたものである。EIS法の高周波数域から求めたR rustについて、SMでは時間とともに値が下がる。これは、さびが形成されるとむしろポーラスになっていくことを示す。一方、CR1やCR2では、R rustが時間とともに増加し、ち密なさびが形成されることを示唆する。また、7% Cr鋼のCR1より、(7% Cr+2% Si)鋼のCR2のR rustが高い値を示し、Siの防食効果が確認できる。一方、EIS法の低周波数域から求めたRtについて、SMでは時間とともに値が下がる。これは、時間とともに腐食がより進行していくことを示す。一方、CR1やCR2では、Rtが時間とともに

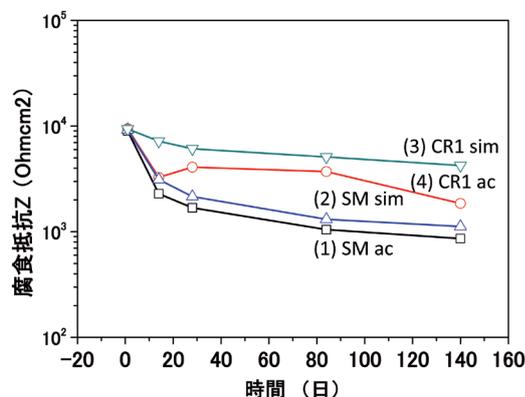


図4 耐食鋼(CR1)および炭素鋼(SM)の腐食抵抗(Z)の変化
CR ac, SM ac: 実際のコンクリート中におけるZ
CR sim, SM: 模擬溶液中のZ

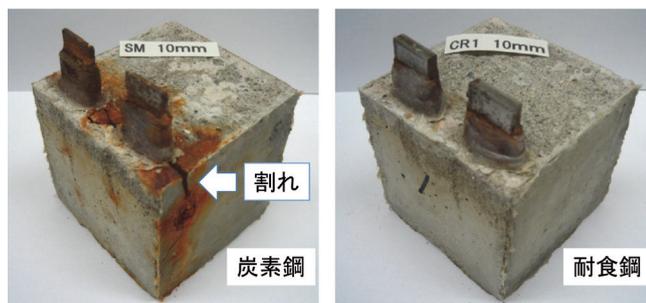


図5 乾湿繰り返し試験2年後のコンクリートブロック
(1) 炭素鋼: SM、耐食鋼: CR1
(2) 1週間の試験条件: 湿润(3% NaCl) 3日+乾燥(25℃、50% RH) 4日

増加し、耐食性がむしろ高くなることを示す。また、CR1よりCR2のRtが高い値を示し、Siの耐食効果が確認できる。以上から、耐食鋼では、腐食の進行に伴い、ち密なさびが形成されて高耐食性を有することが示唆された。

図7は、乾湿繰り返し試験後における耐食鋼CR2のさび断面をSEM (Scanning Electron Microscopy) - EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) で観察したものである。さびの内層において、CrおよびSiの濃化が認められる。また、CrとSiが概ね同一位置で濃化していることから複合鉄酸化物を形成しているものと考えられる。このようなCrとSiを含む複合鉄酸化物では、それ自身が負に帯電し、同様な負イオンである塩素イオンの透過を防ぐ効果(選択透過性)を有するものと推察される¹¹⁾。さらに、微細な複合鉄酸化物で形成されたち密なさび層を形成し、物理的にも化学的にも防食

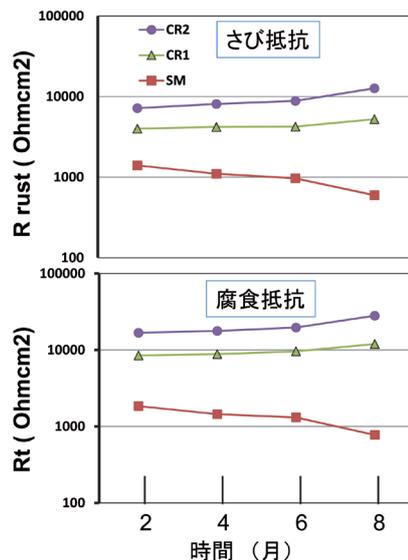


図6 乾湿繰り返し試験におけるコンクリート内部の耐食鋼(CR1, CR2)および炭素鋼(SM)のさび抵抗(R rust)と腐食抵抗(Rt)の変化

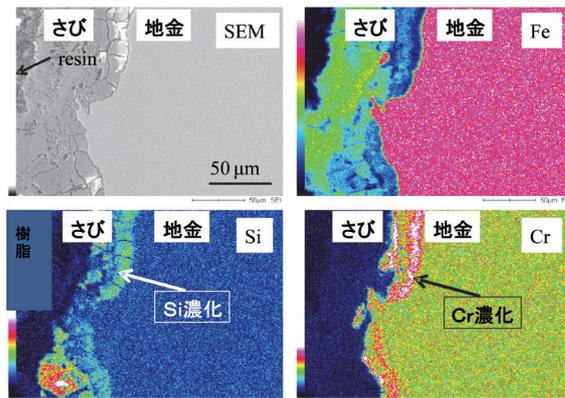


図7 乾湿繰り返し試験後における耐食鋼CR2のさび断面SEM観察

的なきび層により、耐食鋼の高耐食性が発揮されたものと考えられる。

図8に沖縄県宮古島の伊良部大橋における暴露試験状況を示す。暴露試験場を橋梁橋脚に接したテトラポットの上に設置した。従って、高温多湿の環境に加えて、海水が直接掛かるような過酷な環境となっている。暴露試験2年後に回収して腐食状況を確認した。炭素鋼鉄筋では、大きく腐食し、また、コンクリートに割れが生じている。一方、耐食鋼CR2では、鉄筋の腐食が軽微であり、また、コンクリートも健全である。耐食鋼の表面を良く観察すると、まだ金属状態のところも残っており、さびも非常に少ない。ラボにおける連続浸漬試験では、不働態が保持できるレベルの耐食元素 (Cr) を添加しており、また、乾湿繰り返し試験では、部分的に腐食が開始しても、防食的なきび層を形成して腐食が止まることを確認した。このような状況が実際の暴露試験でも実証できていると判断され、耐食鋼の有効性が示された。

4 耐食異形鉄筋の創製と機械的特性

耐食異形鉄筋CR2を創製するにあたり、まず、創製原料の検討を行った (以下、耐食鉄筋は全てCR2)。鉄筋は、低品位

のスクラップ鉄から創製するため、耐食元素も高価な純金属を用いずに低品位のフェロアロイを用いた。具体的には、Cr, Si, Mn添加においては、それぞれ、フェロクロム、フェロシリコン、フェロマンガンを使い、純金属は用いていない。さらに、スクラップ鉄にもグレードがあり、より低品位のものでも使用可能なように、不純物元素と製造技術とを関連させて検討を続けている。

炭素鋼のラインを用いて、耐食異形鉄筋の創製を試みた。図9は、耐食異形鉄筋の創製と機械的特性を纏めたものである。D13 (直径13mm)、長さ4.5mの耐食異形鉄筋の創製に成功した。また、圧延ままでSD345規格の機械的特性を示すように、炭素量と圧延条件を調節している。さらに、この素材を用いて時効処理により、SD390, SD490規格の機械的特性を得ることができる。このように、一回の溶解で幾つかの規格を満たすことができるため、小ロットでの対応が可能である。また、別途、ワンヒートで製造して、熱処理工程を省略する場合は、炭素量を各調節して所定の強度に創製することも可能である。

創製した耐食異形鉄筋SD345の特性を図10に示す。いずれも異形鉄筋の形状ままで求めたものである。引っ張り特性では、伸び (歪み) が30%を超えている。従って、(2) に示す

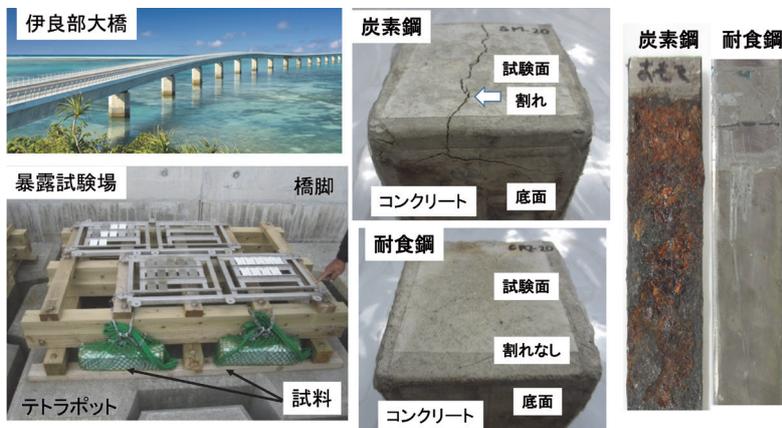


図8 伊良部大橋における暴露試験結果 (2年)



規格	0.2%耐力	引っ張り強度	伸び	絞り	時効熱処理
	N / mm ²	N / mm ²	%	%	°C、1h
SD345	384	685	37	70	圧延まま
SD390	410	642	37	76	550
SD490	500	694	37	70	480

図9 耐食異形鉄筋の創製と機械的特性

ような曲げ加工試験も問題ない。さらに、疲労試験では、応力振幅が400MPaの場合では破断せず、十分な疲労特性を有している。また、線膨張係数は、コンクリートや炭素鋼に近い値を示し、大きな熱サイクルを受けてもコンクリートとの間に剥離や欠陥は生じないと考えられる。

異形鉄筋の代表的な接合としては溶接および圧接がある。耐食鉄筋について今後の用途を考えると、新設橋に大々的に使用されるよりは、老朽化橋梁の補修や更新に適用されると推察される。従って、接合においても炭素鋼との接合を検討すべきである。図11に耐食異形鉄筋の接合について検討した結果を示す。溶接も圧接も種々の方法があるが、日本鉄筋継手協会らが推薦する方法として^{12,13)}、突合せガスシールドアーク半自動溶接および手動ガス圧接を選び、通常の炭素鋼鉄筋の接合条件で耐食鋼と炭素鋼異形鉄筋同士を接合した。いずれの接合においても炭素鋼鉄筋の接合条件のままで接合が可能であり、また、接合部の断面観察では欠陥は認められ

なかった。また、異種金属接触腐食も認められないが、長期的なデータの取得を行っている。

5 今後の展開

(1) 耐食鉄筋

耐食鉄筋では、異形鉄筋の創製技術を確認し、異形鉄筋としての特性について纏めを行った。現在、耐食鉄筋を用いたコンクリート構造体としての特性評価を行っている。図12は、コンクリート大型材の暴露試験を宮古島海岸(10m)で行っている状況である。耐食異形鉄筋では、圧延材(CRA)、酸洗材(CRS)を用い、比較材として炭素鋼鉄筋(SM)を用いている。いずれも実際のコンクリート部材を模擬して、図のように配筋した状態で暴露試験を行っている。このようなコンクリート構造体としての特性評価を行っていき、実橋へのプロト化適用を図っていく予定である。

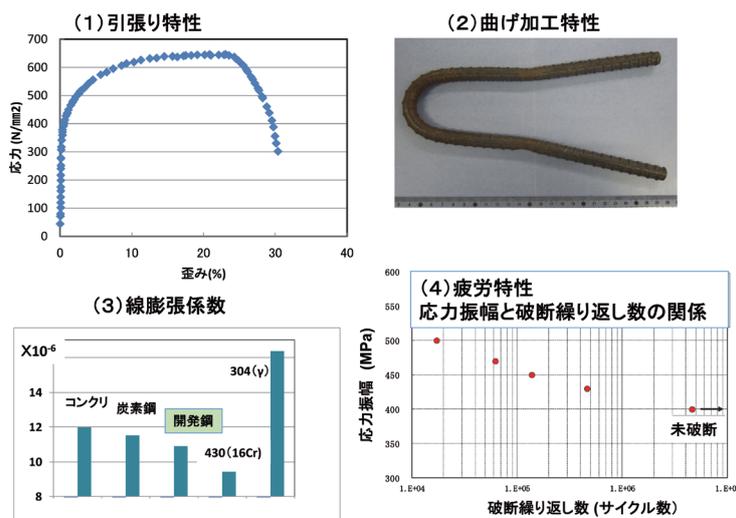


図10 創製した耐食異形鉄筋の特性

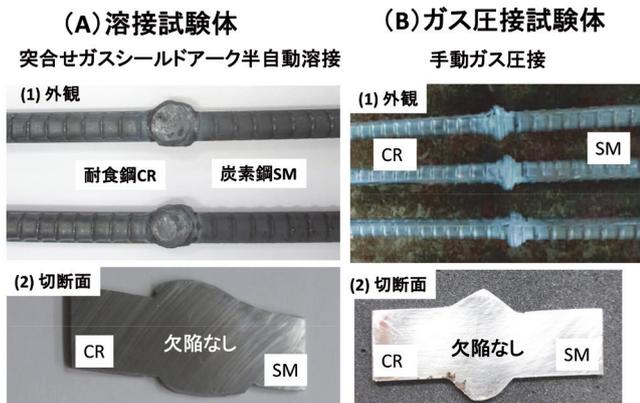


図11 耐食異型鉄筋の接合

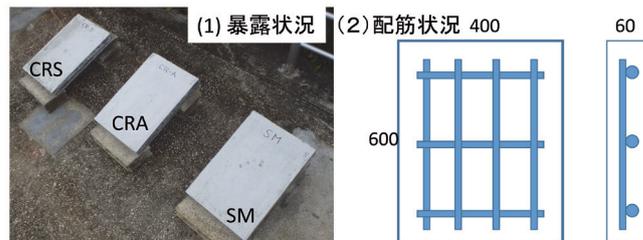


図12 コンクリート大型材暴露試験
宮古島海岸(10m)、600x400x60mm
耐食異形鉄筋：CRA圧延材、CRS酸洗材
炭素鋼鉄筋：SM



図13 内部環境のその場測定例
海浜部にある高架橋にてその場測定実施。

(2) コンクリート内部センシング

コンクリートの内部の環境因子を測定できることは、橋梁維持管理において有用な技術であり、今後さらに発展させていく。例えば、図13は、海浜部にある高架橋にてその場測定実施した例である。橋梁にドリルで細孔を空けて、その底部にセンサーを押し付けて、参照電極との電圧差から塩分量を求めている。同じ細孔についてドリルで深さを調節することにより、深さ方向の塩分分布を測定可能である。図13(3)では、塩分の内部分布を各橋梁部位ごとに比較したものである。高架橋において、内部塩分量は、表面部で高く、内部で低くなる傾向が見られる。厳密には、コンクリート内部の塩分分布が橋梁部位ごとに異なっており、部位ごとの環境測定が重要であることを示している。また、コンクリート内部環境を長期にセンシングする技術も別途、構築中である。今後、道路管理機関や建設機関とも協力して、本センシング技術を用いて橋梁劣化解析を進めていく。

6 まとめ

コンクリート内部環境を正確に測定可能なセンサーを開発し、その結果を利用して内部環境を模擬した溶液中における電気化学測定から耐食鋼の耐食指針を得た。さらに、実際の暴露試験により耐食鋼の高耐食性を実証した。耐食鋼の創製では、低品位原料であるスクラップ鉄およびフェロアロイのみで溶製し、炭素鋼のラインを通して耐食異形鉄筋を作製することを可能とした。今後、耐食鉄筋やセンシング技術の実用化を目指し、各機関と連携して実橋への適用を進めていく予定である。

謝辞

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議のSIP(戦略的イノベーション創造プログラム)「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(管理法人:JST)によって実施された。

参考文献

- 1) SIP「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」, JST(科学技術振興機構)ホームページ, <http://www.jst.go.jp/sip/k07.html>
- 2) ステンレス鉄筋を用いるコンクリート構造物の設計施工指針(案), コンクリートライブラリー130, 土木学会, (2008)
- 3) R.G.Duarte, A.S.Castela, R.Neves, L.Freire and M.F.Montemor : *Electrochim. Acta*, 124 (2014), 218.
- 4) M.Serdar, L.V.Zulj and D.Bjegovic : *Corros. Sci.*, 69 (2013), 149.
- 5) R.D.Moser, P.M.Singh, L.F.Kahn and K.E.Kurtis : *Corros. Sci.*, 57 (2012), 241.
- 6) エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針(改訂版), コンクリートライブラリー112, 土木学会, (2003)
- 7) V.Raman and T.Nishimura : *Mater. Trans.*, 50 (2009), 799.
- 8) T.Nishimura : *Journal of Power and Energy Systems*, 2 (2008), 530.
- 9) V.Raman and T.Nishimura : *J. Solid State Electrochem.*, 14 (2010), 1457.
- 10) T.Nishimura : *ISIJ Int.*, 55 (2015), 173.
- 11) 野田和彦, 西村俊弥, 升田博之, 小玉俊明 : *日本金属学会誌*, 64 (2000), 767.
- 12) 鉄筋継手工事標準仕様書, 溶接継手工事, 日本鉄筋継手協会, (2017)
- 13) 鉄筋継手工事標準仕様書, ガス圧接継手工事, 日本鉄筋継手協会, (2017)

(2017年11月11日受付)