

# 報告 高純度鉄のコンクリート用補強材への適用可能性に関する基礎的検討

平野 裕一\*1・高谷 哲\*2・山本 貴士\*3

**要旨:** 高純度鉄で作られた日本古来の和釘は、1300年以上ほとんど腐食せずに残っている建造物もあり、普通鋼材よりも高い耐食性を有していると考えられる。しかし、高純度鉄の耐食性に関する検討は少なく、特にアルカリ環境での知見はほとんどないのが現状である。そこで、コンクリート用補強材としての利用の可能性を検討することを目的として、強度試験ならびに、様々な pH および塩化物イオンの環境下における水溶液中での腐食試験、ラマン分光分析を行った。その結果、力学的性質は普通鋼材に比べやや劣るものの、pH11 以上の水溶液中で耐食性に優れ、塩化物イオンに対する耐食性も優れていることが分かった。

**キーワード:** 高純度鉄, アルカリ環境, 耐食性,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , 腐食試験, 引張試験

## 1. はじめに

奈良県にある法隆寺金堂は、7世紀初めに創建され、一度消失した後、7世紀中に再建された<sup>3)</sup>。再建後1300年以上が経過しているが、そこで使われている和釘はほとんど腐食していないことが確認されている。和釘は砂鉄を原料とし、たたらという技法で作られ、純度99%以上であることが理由であると考えられている<sup>4)</sup>。本報告では、この優れた耐食性能を持つ和釘の性質に着目した。

しかし、法隆寺金堂では、和釘は木材に用いられているが、木材中とコンクリート中では環境が大きく異なる。木材中は弱酸性の pH4~6 と言われているが<sup>5)</sup>、コンクリート中では pH12~13 である<sup>6)</sup>。また、塩化物イオン ( $\text{Cl}^-$ ) の影響を受ける可能性がある。

本報告では、コンクリート用補強材としての利用の可能性を検討することを目的として、高純度鉄の力学的性質およびアルカリ環境下における耐食性能を検討した。

## 2. 試験材料

高純度鉄の試験材料として、和釘と同じ性質の試験片を入手するのが困難であったため、本報告では、JIS C 2504-2000 に規定する電磁軟鉄 SUY-1 を用いた。電磁軟鉄は電磁石や磁気クラッチ、発電機、モータ鉄心などに用いられる。JIS 規格に規定する成分は、炭素の質量パーセントが 0.030% 以下であり、他の微量金属元素を含めても鉄の純度は 99% 以上である。例えば、普通鉄筋で用いられる SD345 の鉄の純度は 97% 程度である。

和釘と電磁軟鉄とは製造方法は異なるが、本報告では鉄の純度の高さに注目し、鉄の純度が 99% 以上の点を共通であるとし、電磁軟鉄を高純度鉄として取り扱う。

本報告では、普通鉄筋 SD345 および普通鋼材 SS400、

ステンレス鉄筋 SUS410 と比較しながら検討を実施する。

## 3. 力学試験

### 3.1 引張試験

#### (1) 目的

コンクリート用補強材として用いるためには、高純度鉄の機械的性質の把握が不可欠である。そこでまず、基礎的な機械的性質を把握するため引張試験を行った。

#### (2) 実験概要

高純度鉄の試験片として直径  $\phi 10$  mm の磨き丸鋼を用いた。黒皮付きの SUY-1 である。比較用として、異形鉄筋 SD345 および丸鋼 SS400、ステンレス異形鉄筋 SUS410 を用い、いずれも丸鋼は直径 10 mm、異形鉄筋は呼び名 D10 のものを用いた。これらを用い JIS Z 2241-2011 引張試験を行い、応力-ひずみ関係を計測した。評点距離は直径あるいは公称直径の 8 倍とし、計測した鉛直変位からひずみを算出した。試験数はそれぞれ  $N=3$  とした。

#### (3) 実験結果および考察

SUY-1 および SD345, SS400, SUS410 のそれぞれの応力-ひずみ関係を図-1~4 に示す。これらのグラフから読み取った降伏点と引張強さを図-5 に示す。なお、つかみ部分に滑りがあったため、応力-ひずみ関係の立ち上がり部分の応力増加がいずれも小さくなっている。

図-1~4 を見ると、異形鉄筋として用いられている SD345 と SUS410 は、応力-ひずみの形状が比較的似ているのに対し、SUY-1 は、破断伸びが半分程度である。降伏後の応力増加が小さく、加工硬化を起こしにくいと考えられる。また、SUY-1 は急激に破断することなく応力がゼロ付近になるまで伸び続けた。SS400 は降伏点が判別できず、引張強さは SD345 および SUS410 の 1.5 倍程

\*1 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻技術職員 (正会員)

\*2 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻助教 博士(工学) (正会員)

\*3 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻教授 博士(工学) (正会員)

度あるが、破断伸びは SUY-1 のさらに半分程度である。

SUY-1 の実験値と JIS G 3112 - 2010 で規定する SD345 の降伏点および引張強さとの比較を表-1 に示す。降伏点は、鉄筋コンクリート用棒鋼の JIS 規格を満たすが引張強さは下回る。

### 3.2 金属材料曲げ試験

#### (1) 目的

金属材料曲げ試験を行い、材料の曲げ性を検討した。

#### (2) 実験概要

試験材料は、3.1 で用いたものと同じ丸鋼 SUY-1 および異形鉄筋 SD345、丸鋼 SS400、ステンレス異形鉄筋 SUS410 を用い、いずれも丸鋼は直径 10 mm、異形鉄筋は呼び名 D10 のものを用いた。これらを用い JIS Z 2248-2014 金属材料曲げ試験を行い、試験片湾曲部の外側の裂けきずの有無を調べた。曲げ角度と内側半径は、JIS G 3112 鉄筋コンクリート用棒鋼に準拠し、それぞれ 180 度、公称直径の 1.5 倍の 15 mm とした。試験数はそれぞれ N=1 とした。

なお、JIS C 2504-2000 電磁軟鉄には SUY-1 の耐曲げ性の記載はあるが、曲げ角度が 90 度と規定されていることから、構造材料の検討をするため、鉄筋コンクリート用棒鋼に準拠した方法により実施した。

#### (3) 実験結果および考察

試験片湾曲部の外側の様子を写真-1 に示す。SUY-1 および SD345、SS400、SUS410 のいずれも、試験片湾曲部の外側の裂けきずは確認されなかったため、SUY-1 の曲げ性は、鉄筋コンクリート用棒鋼の JIS 規格を満たす。

### 3.3 ビッカース硬さ試験

#### (1) 目的

ビッカース硬さ試験を行い、材料の硬さを検討する。

#### (2) 実験概要

試験材料は、3.1 で用いたものと同じ棒鋼を切断した断面に対して、JIS Z 2244-2003 で規定するビッカース硬さ試験を実施した。試験荷重は 19.61 N、試験保持時間は 15 秒とした。試験数はそれぞれ N=5 とした。

#### (3) 実験結果および考察

試験結果を図-6 に示す。示している結果は 5 回の平均である。5 回の試験値の範囲をエラーバーに示す。SD345 および SS400、SUS410 はいずれも 280 程度であるが、SUY-1 は 190 程度であり、他の金属と比較して 3



写真-1 試験片湾曲部の外側の様子

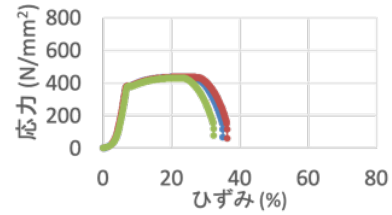


図-1 応力-ひずみ関係 (SUY-1)

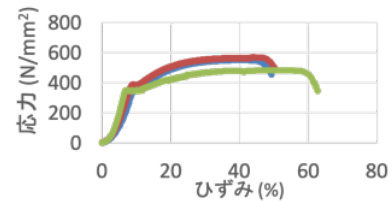


図-2 応力-ひずみ関係 (SD345)

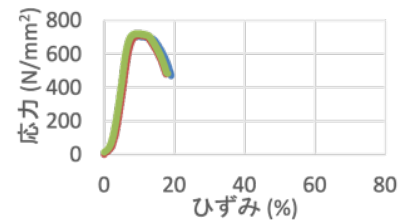


図-3 応力-ひずみ関係 (SS400)

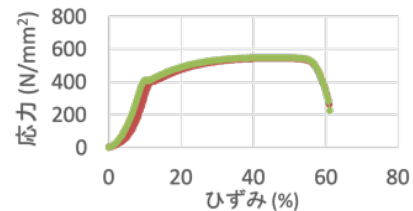


図-4 応力-ひずみ関係 (SUS410)

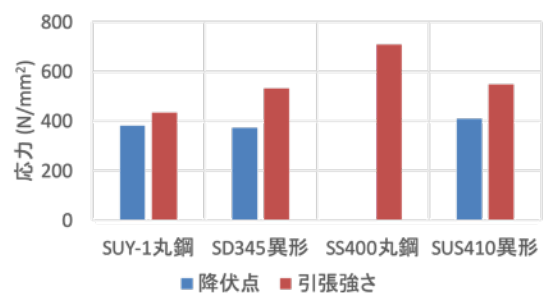


図-5 降伏点と引張強さ

表-1 JIS 規格との比較

	降伏点 (N/mm²)	引張強さ (N/mm²)
電磁軟鉄 SUY-1 【実験値】	381	434
異形棒鋼 SD 345 【JIS G 3112 - 2010】	345~440	490 以上

割程度低い値となった。SUY-1 は比較的柔らかい材料であり、切断加工や切削加工はやや難しいと考えられる。

### 3.4 力学試験の考察

3.1(3)の応力-ひずみ関係から、SUY-1 は加工硬化を起こしにくい性質が伺われ、普通鉄筋のように隅角部の加工部分にき裂が生じにくい可能性も期待されることから、曲げ内半径を十分に取れない場合のスターラップやフープ筋、床版継手などの使用に効果があると考えられる。

## 4. 腐食試験

### 4.1 自然電位測定

#### (1) 目的

高純度鉄の自然電位を把握し、普通鋼材との比較検討を目的とする。

#### (2) 実験概要

試験片は 2000 番までのサンドペーパーで鏡面仕上げした 10×10×1.5 mm の SUY-1 および SS400 を用いた。アセトンで脱脂処理した後、試験片の鏡面仕上げをしていない方の面にリード線の一端を接触させ、鏡面仕上げをした面のみが露出するように周囲をエポキシ系樹脂により被覆した。約 1000 mL のふた付きの容器に水溶液を満たし、リード線をぶら下げるように水溶液中に浸漬させた。pH の調整は、コンクリート中を模擬した pH12.6 および中性化したコンクリートを模擬した pH11 とし、NaOH を溶質とした。測定時は電極が通る程度にふたに開けた穴のみを開放し、測定終了後は直ちに穴をふさぎ水溶液が大気に触れる時間を極力少なくするよう注意した。参照電極には銀塩化銀電極を用い、水溶液中で測定した。浸漬から 14 日経過後まで、数日おきに測定した。試験数は N=2 とした。

#### (3) 実験結果および考察

自然電位測定結果を図-7 に示す。pH の次の添字は同じ条件の試験片を区別するためである。図中の赤のラインは-240 mV を示す。浸漬から 1 日後には電位が落ち着き、2 日後以降は概ね安定し、電位が緩やかな低下傾向になっている。全体的に SUY-1 の方が浸漬後の電位の低下が早い傾向にある。

pH12.6 の水溶液の試験片では、この期間で腐食が確認されなかった。しかし、pH11 の溶液の試験片では、浸漬 7 日後に SS400 に、浸漬 9 日後に SUY-1 に、試験片端部に腐食が確認された。容器に入れ水溶液に浸したままで撮影したので、鮮明ではないが、水溶液浸漬後に腐食が確認された試験片表面の様子を写真-2 に示す。

pH12.6 および pH11 の水溶液に浸漬した一つずつの SS400 の試験片以外は、浸漬 14 日後の自然電位が-400 ~ -600 mV となっている。一方で、腐食が確認されたのは pH11 の水溶液の試験片のみであった。

ここで、ASTM C 876<sup>5)</sup> (銅硫酸銅電極基準(vs. CSE),

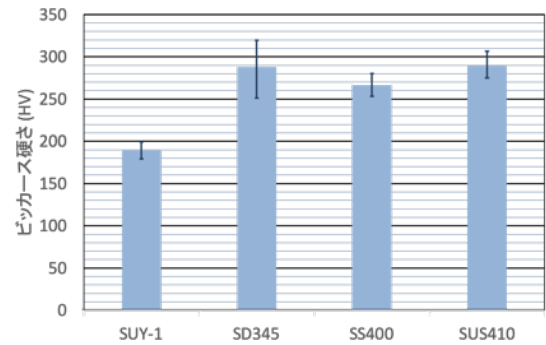


図-6 ビッカース硬さ

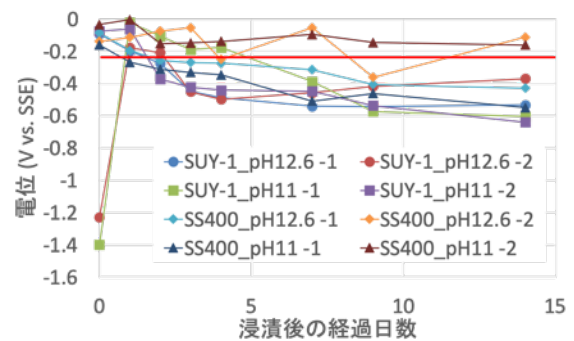


図-7 SUY-1 および SS400 の自然電位変化 (赤のラインは-240 mV)

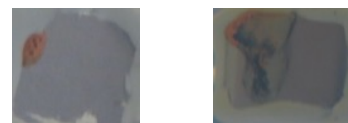


写真-2 腐食が確認された試験片表面

左 : SS400 pH11 -1 (7 日経過時点)

右 : SUY-1 pH11 -1 (9 日経過時点)

20℃換算) を文献<sup>6)</sup>により銀塩化銀電極基準(vs. SSE)に換算すると、-240 mV 以下であれば 90%以上の確率で腐食発生とされており、pH12.6 の水溶液に浸漬した試験片も腐食発生電位といえるが、外観上の変化はないため、試験片表面に耐食性の酸化皮膜が形成された可能性が考えられる。また、pH12.6 の SUY-1 では電位の低下が早いいため、酸化皮膜の形成も SS400 より早いと考えられる。

なお、pH12.6 および pH11 の水溶液に浸漬した一つずつの SS400 が-150 mV 程度であるのは、表面の欠陥が少ないため電位の低下が緩やかになっていると考えられる。

### 4.2 腐食に与える pH および Cl<sup>-</sup>の影響

#### (1) 目的

Cl<sup>-</sup>による鋼材腐食を想定し、pH12.6 および pH11 の水溶液に Cl<sup>-</sup>を加えた浸漬試験から腐食条件を検討した。

#### (2) 実験概要

試験片は、2000 番までのサンドペーパーで鏡面仕上げした 10×10×1.5 mm の SUY-1 および SS400 を用いた。アセトンで脱脂処理した後、pH を調整した水溶液に浸漬さ

せた。pH 調整の溶質は NaOH としそれぞれ pH12.6 および 11 に調整した。ふた付きのプラスチック製シャーレに約 80 mL 水溶液を入れ試験片を浸漬させ、20°Cの室内に静置した。密封はしておらず、水溶液は空気との接触が常時ある状態である。

Cl<sup>-</sup>の添加時期の検討として、4.1 より、自然電位が概ね安定した水溶液浸漬 2 日後に、最初に浸漬した水溶液中での条件において試験片表面の反応が安定すると考え、最初は Cl<sup>-</sup>を加えずに試験片を水溶液に浸漬し、水溶液浸漬 2 日後に Cl<sup>-</sup>を添加することとした。Cl<sup>-</sup>をコンクリートに対し 0.5, 5 kg/m<sup>3</sup> 相当の量添加し、試験片表面の変化を観察した。試験数は N=1 とした。

ここで、Cl<sup>-</sup>が 0.5 kg/m<sup>3</sup> 相当とは、45 L の水に 0.5 kg の Cl<sup>-</sup>が溶けているときの濃度とした。これは、JIS A 5308-2014 に規定するレディーミクストコンクリートの普通コンクリートの空気量 4.5%を参考にしたものである。コンクリート 1 m<sup>3</sup> 中の空気量 4.5%の部分と同じ体積分の水がコンクリート細孔中を自由に移動できると仮定した。この仮定の下で Cl<sup>-</sup>/OH<sup>-</sup>を計算すると、pH12.6 の Cl<sup>-</sup> 0.5 kg/m<sup>3</sup> では Cl<sup>-</sup>/OH<sup>-</sup> = 7.75, Cl<sup>-</sup> 5 kg/m<sup>3</sup> では Cl<sup>-</sup>/OH<sup>-</sup> = 77.5, pH11 の Cl<sup>-</sup> 0.5 kg/m<sup>3</sup> では Cl<sup>-</sup>/OH<sup>-</sup> = 310 となる。

### (3) 実験結果および考察

浸漬中の SUY-1 および SS400 の試験片表面の変化の様子をそれぞれ図-8, 10 に示す。その際の水溶液の pH 推移をそれぞれ図-9, 11 に示す。

pH12.6 の水溶液において、SUY-1 では Cl<sup>-</sup>の添加にかかわらず、いずれも表面状態に変化が見られず、腐食していないことが分かる。Cl<sup>-</sup> 0.5 kg/m<sup>3</sup>, 5 kg/m<sup>3</sup> の水溶液でも腐食しないことから、形成した酸化皮膜が高い耐食効果を維持していると考えられる。

一方、pH12.6 の水溶液において、SS400 では Cl<sup>-</sup> 0 kg/m<sup>3</sup>, 0.5 kg/m<sup>3</sup> のいずれも表面状態に変化が見られなかった。Cl<sup>-</sup> 5 kg/m<sup>3</sup> の水溶液では Cl<sup>-</sup>の添加 1 日後である浸漬後 3 日後から表面の一部に黒色の腐食生成物が見られた。Cl<sup>-</sup>の添加後に腐食が生じたことから、Cl<sup>-</sup>の影響により酸化皮膜が部分的に破壊されたことが考えられる。

pH11 の水溶液において、SUY-1, SS400 共に Cl<sup>-</sup>の添加の有無にかかわらず、いずれも水溶液浸漬 2 日後までに切断端部の一部が赤茶色に変色し、7 日後までに試験片表面に赤茶色の腐食が確認された。Cl<sup>-</sup> 0 kg/m<sup>3</sup> の水溶液において、SS400 では、Cl<sup>-</sup>の添加 1 日後である浸漬後 3 日後から、表面の大部分を覆う赤茶色の腐食が確認された。SUY-1 では、4 日後までは表面に腐食は確認されないが、7 日後に表面の半分程度の面積に腐食が確認された。よって、pH11 で Cl<sup>-</sup>の添加がない水溶液では、SUY-1の方が腐食の進行が遅いと考えられる。

また、pH11 の Cl<sup>-</sup>の添加がある水溶液において、3 日後、つまり Cl<sup>-</sup>添加の 1 日後には腐食が確認された。腐食

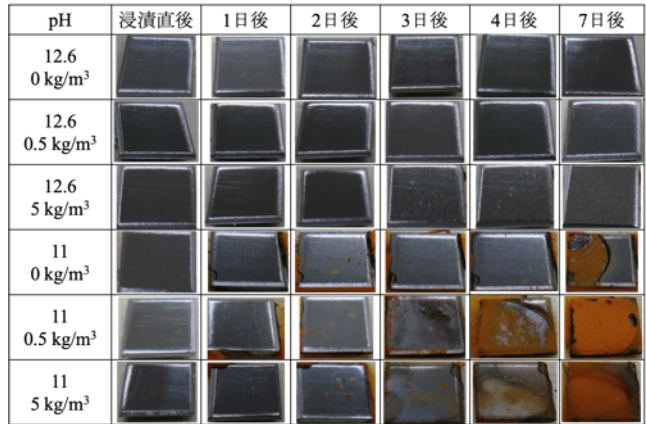


図-8 浸漬中の SUY-1 の試験片表面の変化 (2 日後に Cl<sup>-</sup> 添加)

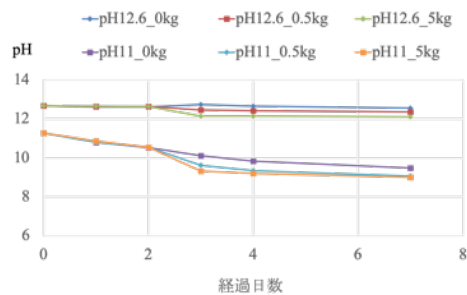


図-9 SUY-1 の浸漬水溶液の pH 推移

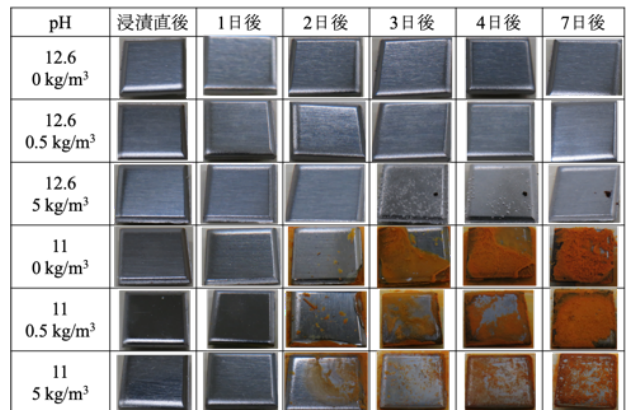


図-10 浸漬中の SS400 の試験片表面の変化 (2 日後に Cl<sup>-</sup> 添加)

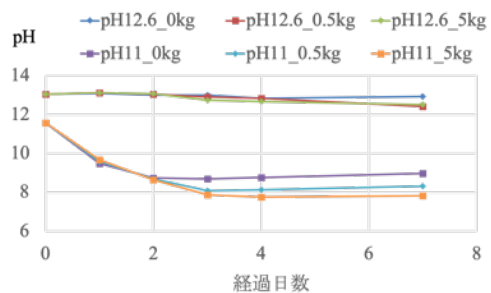


図-11 SS400 の浸漬水溶液の pH 推移

の開始時期は SUY-1 と SS400 とでは同程度であると考えられる。Cl<sup>-</sup> 0 kg/m<sup>3</sup>, 0.5 kg/m<sup>3</sup> の水溶液では赤茶色の腐食と鋼材との間に黒色の腐食層が見られる。しかし、Cl<sup>-</sup> 5 kg/m<sup>3</sup> の水溶液では黒色の腐食層が見られず、赤茶色の腐食生成物が試験片表面に浮遊しているのがわかる。水溶液中の Cl<sup>-</sup>濃度が高くなると溶存酸素量が減少するため、5 kg/m<sup>3</sup> 相当の Cl<sup>-</sup>量は、腐食速度が最大となる Cl<sup>-</sup>量よりもかなり多くなる。したがって、Cl<sup>-</sup> 5 kg/m<sup>3</sup> の水溶液では初期の酸化で Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> の皮膜が形成し、その後の腐食進行が遅くなったことから酸素欠乏状態とならず、赤さびが形成したと考えられる。なお、pH12.6 の水溶液では十分な量の水酸化物イオンが存在するため、pH は浸漬直後からほとんど変化していない。

これらの結果から、SUY-1 は SS400 と比べ耐食性能が向上し、耐食性の酸化皮膜により pH12.6 の水溶液中では Cl<sup>-</sup> に対し、その効果を維持していると考えられる。また、pH11 で Cl<sup>-</sup> の添加がない水溶液では SUY-1 は SS400 と比べ腐食の進行が遅く、耐食性に優れていると考えられる。

#### 4.3 ラマン分光分析

##### (1) 目的

ここまで議論してきた耐食性の酸化皮膜の考察を進めるため、pH および Cl<sup>-</sup> の各条件で表面に形成される酸化皮膜の結晶性を、ラマン分光による分析により検討した。

##### (2) ラマン分光分析の原理

図-12 に示すように、物質に光を照射すると、ほとんどが照射光と同じレイリー散乱光と、わずかに波長の異なるラマン散乱光に分光する。レイリー散乱光とラマン散乱光のエネルギー差は、物質中の原子間振動のエネルギーに対応する。エネルギーに比例する単位として波長の逆数である波数(単位は cm<sup>-1</sup>)を用いて、レイリー散乱光との波数差がラマンシフトとなる<sup>8)</sup>。ラマンシフトを並べたものがラマンスペクトルである。そのため、原子間振動のエネルギーに対応するラマンスペクトルには、物質中原子の結合情報が反映される。

ラマンスペクトルからは、ピークの位置で分子の構造(結合)、ピークの高さで相対的な濃度、半値幅で結晶性などの情報を得ることができる。半値幅とはピークの高さが半分位置でのピークの幅のことである。Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> の結晶性と半値幅の関係を図-13 に示す。なお、図中の Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> では酸素が省略されている。Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> の結晶性が悪いときは分子や結晶組織が規則正しく並んでいないため、結合エネルギーのバラツキが大きくなるため半値幅が大きくなるが、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> の結晶性が良いと、結合エネルギーのバラツキが小さく振動モードが揃うため、半値幅が小さくなる<sup>9)</sup>。本報告では、SS400 と SUY-1 の pH12.6 における耐食性の違いを検討するため、皮膜の結晶性を半値幅により比較した。

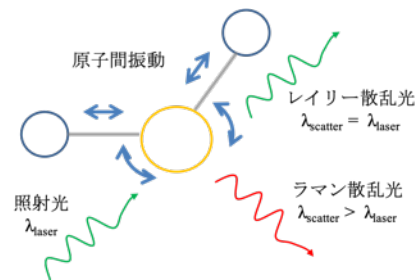


図-12 ラマン散乱の原理

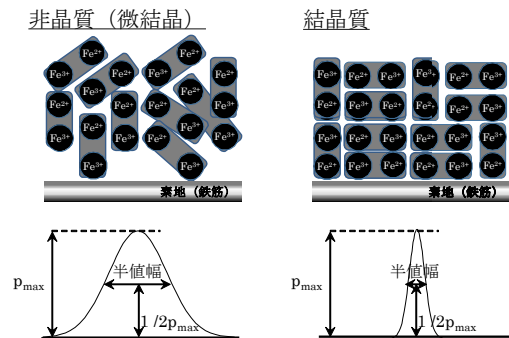


図-13 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> の結晶性と半値幅

##### (3) 実験概要

pH12.6 Cl<sup>-</sup> 0 kg/m<sup>3</sup> の条件の試験片について、7. で使用した SUY-1 を水溶液浸漬後 11 日目に、SS400 を水溶液浸漬後 14 日目にラマン分光分析を実施した。入射光には 532 nm のレーザーを使用し、熱による試料の変質を防ぐために 20℃ の室内に静置した水溶液中で測定した。

##### (4) 実験結果および考察

測定したラマンスペクトルを図-14 に示す。横軸はラマンシフト(cm<sup>-1</sup>)、縦軸はカウント数である。スペクトルは上から SUY-1, SS400 である。Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> のレファレンススペクトルを図-15 に示す。662 cm<sup>-1</sup> の補助線は、レファレンススペクトルに見られる Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> の特徴的なピークを表している。SS400 では 662 cm<sup>-1</sup> にピークが確認され、酸化皮膜は Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> であると考えられる。高アルカリ環境での SS400 の酸化皮膜が Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> であることは先行研究<sup>10)</sup>の結果と一致している。一方で、SUY-1 ではカーブフィッティングを行うと 662 cm<sup>-1</sup> に加えて 720 cm<sup>-1</sup> 付近の 2 つのピークの複合スペクトルであると判断された。720 cm<sup>-1</sup> のピークはシフトした Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> であると考えられる。ピークが右にシフトするということは結合エネルギーそのものが強くなっていることを表しており、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> の結晶層が緻密になったことを表している<sup>11)</sup>。

半値幅を比較すると、SUY-1 が 53 cm<sup>-1</sup>、SS400 が 73 cm<sup>-1</sup> であった。したがって、SUY-1 の方が半値幅が小さく結晶性が良くなっていると考えられる。結晶性が良くなると、結晶構造の欠陥が少なく溶解しにくくなるため、SUY-1 では SS400 に比べ酸化皮膜の結晶性が良く緻密になったことで耐食性が向上したと考えられる。

#### 4.4 腐食試験の考察

SUY-1 は SS400 に比べて結晶性が良く緻密な酸化皮膜により pH12.6 の水溶液中で耐食効果を維持していると考えられる。また、pH11 で Cl<sup>-</sup> の添加がない水溶液では SUY-1 は SS400 に比べて腐食の進行が遅く、耐食性に優れていると考えられる。

#### 5. 結論

普通鋼材 SS400 に対する定量的な耐食性改善効果については今後さらなる検討が必要ではあるものの、本報告の範囲内で得られた高純度鉄(SUY-1)の鉄筋コンクリート用補強材としての可能性を示す特性の知見をまとめる。

- (1) 鉄筋コンクリート用棒鋼の JIS 規格に対し、降伏点、曲げ性は満足したが、引張強さは下回り、ビッカース硬さは普通鋼材より小さかった。このことから、加工硬化を起こしにくく、隅角部の加工部分にき裂が生じにくいと考えられることから、曲げ内半径を十分に取れない場合のスターラップやフープ筋、床版継手などへの使用に効果があると考えられる。
- (2) pH11 の水溶液に浸漬した状態において、Cl<sup>-</sup> の添加があるものは、高純度鉄と普通鋼材の腐食進行は同程度であった。一方、Cl<sup>-</sup> の添加がないものは、高純度鉄の方が普通鋼材よりも腐食の進行が遅く、耐食性により優れている可能性が見出された。
- (3) pH12.6 の水溶液に浸漬した高純度鉄に形成される耐食性の酸化皮膜は、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> と考えられる分析結果であった。普通鋼材に形成される酸化皮膜よりも結晶性の良い緻密な構造であり、Cl<sup>-</sup> の作用に対し腐食の進行を抑えることができると考えられる。

#### 謝辞

本報告の一部は JSPS 科研費 JP18H00277 の助成を受けたものである。

#### 参考文献

- 1) 法隆寺金堂 : <http://www.horyuji.or.jp/garan/kondo> (閲覧日 : 2018 年 5 月 24 日)
- 2) いよぎん地域経済研究センター : <http://irc.iyobank.co.jp/topics/close-up/no084.htm> (閲覧日 : 2015 年 9 月 25 日)
- 3) 北尾弘一郎 : 木材中における成分分布, 材料, 第 12 巻, 第 121 号, pp.727-732, 1963.10
- 4) 宮川豊章, 六郷恵哲編 : 土木材料学, 朝倉書店, p.55, 2013.6
- 5) ASTM C 876-91(Reapproved1999) : Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, Annual Book of ASTM Standards, Vol.03.02, pp.457-462, 1999

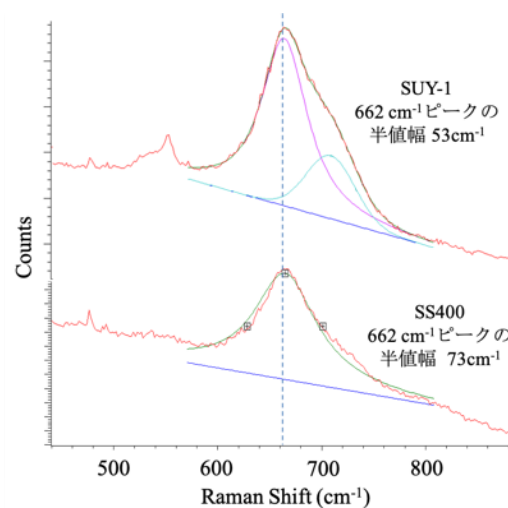


図-14 SUY-1 と SS400 の結晶性比較  
(補助線は 662 cm<sup>-1</sup>, 図-15 も同様)

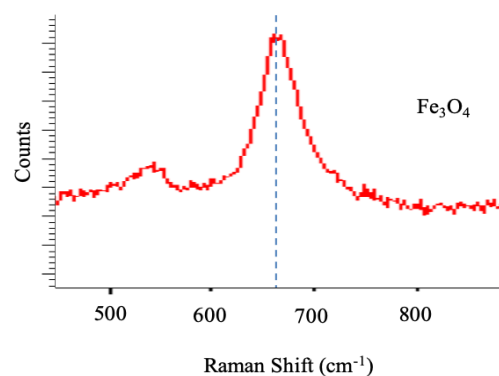


図-15 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> のレファレンススペクトル

- 6) 日本コンクリート工学会 : コンクリート診断技術 '16 [基礎編], 日本コンクリート工学会, p.192, 2016.2
- 7) R. T. Foley: Role of the Chloride Ion in Iron Corrosion, Corrosion, vol.26, No.2, pp.58-70,1970
- 8) 日本分析機器工業会 : <https://www.jaima.or.jp/jp/analytical/basic/spectroscopy/raman/> (閲覧日 : 2019 年 4 月 25 日)
- 9) 磯尾賢太郎, 足立涼子 : 顕微レーザーラマン分光法による先端材料評価技術, こべるにくす, No.40, pp.8-10, 2013.2
- 10) 高谷哲, 奥野翔矢, 本田正和, 川上圭司, 左藤眞市, 羽村陽平, 山本貴士, 宮川豊章 : アルカリ環境下における鉄系腐食生成物の生成プロセスおよびコンクリート中における鉄筋の腐食環境, 材料, vol.66, No.8, pp.545-552, 2017.8
- 11) 吉川昂博, 高谷哲, 山本貴士, 羽村陽平, 高橋良和 : 腐食進行過程で生成する保護性さびの微細構造, 第 73 回土木学会年次学術講演会講演概要集, V-350, 2018