

1 **Abstract:**

2 The utility of hyperspectral measurement was assessed as a means of predicting the corrosion
3 risk of steel materials based on surface information. Carbon steels exposed to outdoor conditions in
4 Choshi and Miyakojima were used as the test specimens. Exposure tests were conducted every six
5 months for a duration of two and a half years. Corrosion loss was calculated by comparing the
6 weight of specimens before exposure test and after removing corrosion products from the surface.
7 Hyperspectral measurements were conducted on these specimens, with corrosion products
8 identified through SAM (Spectral Angle Mapper) analysis. α -FeOOH, β -FeOOH, γ -FeOOH, and
9 Fe_3O_4 were employed as reference data for SAM analysis. In both Choshi and Miyakojima test
10 sites, γ -FeOOH was predominantly detected on the specimens after ordinary exposure tests,
11 whereas Fe_3O_4 was prevalent on the specimens exposed to sheltered environments. The correlation
12 between the proportion of each corrosion product identified through SAM analysis and the amount
13 of corrosion change for one year was explored. α -FeOOH exhibited a positive correlation with the
14 amount of corrosion change, whereas the amount of corrosion change tended to decrease with an
15 increase in β -FeOOH fraction.

16

17 **Keywords:**

18 Hyperspectral measurement; Carbon steel; Corrosion; Corrosion product; Exposure test.

19

20

21 1. 緒言

22 我が国のインフラ構造物の多くは高度経済成長期に建設されており、近年は腐食による
23 高経年劣化が大きな問題になっている。このような状況下で、従来のようなインフラが大
24 きく損傷してから修理・修繕する事後保全型の維持管理を続けた場合、2048年度までに
25 約12.3兆円の費用が必要になると試算されている。これに対し、適切に点検をしてイン
26 フラが致命的なダメージを受ける前に少しずつメンテナンスを重ねる予防保全型メンテナ
27 ンスを実施した場合、およそ50%のコスト低減が期待できると報告されている¹⁾。しかし
28 ながら、橋梁では全体のおよそ9割を地方公共団体が管理しており、維持管理に携わる専
29 門人材の不足や維持管理コストなどの経済面の課題を抱えている地方公共団体において
30 は、維持管理そのものの負担が非常に大きく、より簡便で効率的かつ客観的に予防保全型
31 維持管理が可能な劣化診断技術が求められている。

32 現在のインフラ構造物の腐食劣化診断は、診断者の主観が多分に含まれる近接目視²⁾が
33 主流であるが、近年では、客観的かつ定量的評価法として光学的な診断技術が提案されて
34 いる。Choiら³⁾は、デジタルカメラなどによる撮影画像を色、テクスチャ、形状の3つの
35 カテゴリーによって特徴づけ、腐食損傷を均一腐食、隙間腐食、孔食、フレット腐食、
36 粒界腐食に自動的に分類する手法を提案している。また、Felicianoら⁴⁾は、大気腐
37 食試験を行ったASTM A36鋼について表面外観の連続写真を取得し、それらのテクスチャ
38 分析から表面劣化速度の指標を得ることができると報告している。さらに、萩原ら⁵⁾は農
39 業用排水路で用いられる鋼矢板の表面画像におけるテクスチャの均質性と空間的異方性か
40 ら、非腐食、腐食および孔食の定量評価の可能性を示唆している。しかしながら、いずれ
41 の手法も外観から腐食の有無や形態、その範囲を評価する腐食劣化診断技術であり、効率
42 的に予防保全型管理を行うためには、簡便で定量的に評価できるだけでなく、評価した腐
43 食状況からその後に腐食が進行するのか、現状維持なのかなど腐食リスクまで予測できる
44 ことが重要である。そこで、診断ツールとして、波長をより細かく分光することで人間の
45 目やデジタルカメラでは評価困難な物質の特性や状態などを可視化できるハイパースペク
46 トルカメラに着目した。

47 ハイパースペクトルイメージングは、スペクトル情報を紫外線域から近赤外線域の広い
48 波長帯において詳細に分光イメージングする技術であり⁶⁾、得られるハイパースペクトル
49 画像は、二次元の位置情報に加え、その場所の特性を示す情報の三次元データとなる。近
50 年、ハイパースペクトル測定による評価・解析は幅広い分野で使用されており、事例とし
51 て、ゴムシートやコンクリートなどの材料の劣化評価⁷⁻⁹⁾や森林の植生や活力度の調査¹⁰⁾
52 ¹¹⁾などがある。また、金属の腐食に関連した適用例としては、車両フレームのさびの進行
53 度を可視化した例¹²⁾がある。さらに、小林ら¹³⁾は鉄鋼材料のハイパースペクトルについ
54 て正規化指数解析をおこない、得られた指標により耐食性評価が可能であることを示し
55 た。しかしながら、正規化指数解析は、外観のさびの色の反射特性を指標化した解析であ
56 り、得られた指標の物理的意味は十分明らかになっていない。

57 本研究では、鉄鋼材料の表面の情報からその後の腐食リスクを予測する手法を確立する
58 ことを目的として、屋外で腐食試験した炭素鋼についてハイパースペクトル解析を行い、
59 形成される腐食生成物の識別を行った。さらに、腐食変化量と識別した腐食生成物量との
60 関係を調査し、腐食リスクを予測する手法としてのハイパースペクトル測定の有用性につ
61 いて検討した。

62

63 2. 実験方法

64 2.1 試料

65 鉄系腐食生成物の同定を行うための教師スペクトルの測定用試料には、4種類の既知の
66 鉄系腐食生成物 (α -FeOOH, β -FeOOH, γ -FeOOH, Fe₃O₄) を用いた。測定前の準備とし
67 て、メノウ製の乳鉢および乳棒を用いてそれぞれおよそ 10 分間粉碎した。

68 ハイパースペクトル解析の有用性を検証するための試験片には、屋外環境で暴露試験し
69 た炭素鋼を用いた。炭素鋼のサイズは 170 x 70 x 5t (mm) であり、試験片の化学成分は
70 Table 1 に示す通りである。試験片表面を Ra 0.4~1.6 μ m 程度で研削後、2021 年 4 月から
71 2023 年 10 月までの期間において、日本ウェザリングテストセンター銚子試験場 (北緯
72 35°43', 東経 140°45') および宮古島試験場 (北緯 24°44', 東経 125°19') で直接暴露試験

73 および遮蔽暴露試験¹⁴⁾を実施した。暴露試験期間中の銚子試験場および宮古島試験場の
74 環境データの平均値を Table 2 に示す。試験片の暴露試験期間は 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5
75 年であり、それぞれ n=4 で試験を行った。腐食減量は 4 枚のうち 3 枚を用いて、腐食生成
76 物を除去後、重量測定を行い暴露試験前の重量との差を平均して求めた。ハイパースペク
77 トル測定は、残りの 1 枚で行った。

78

79 2.2 ハイパースペクトル測定

80 ハイパースペクトル測定には、分解能 5 nm で 350 nm – 1100 nm の測定波長範囲のスペ
81 クトル画像を取得できるハイパースペクトルカメラ（エバ・ジャパン社製 NH-7）を用い
82 た。Fig.1 に測定システムの外観図を示す。試料は試料台に水平になるように設置し、鉛
83 直下向きに配置されたハイパースペクトルカメラにより上方から測定した。測定する際の
84 光源にはハロゲンランプを用い、3 方向から同時に照射した。光を均一に照射するため、
85 試料の周囲には光拡散ボックスを設けた。測定手順としては、最初に光源データとして白
86 板を被写体として撮影し、次に測定対象物を撮影した（分光データ）。各ピクセルで分光
87 データを光源データで除算することにより反射率を求めた。測定は Fig.2 に示す全域ある
88 いは中心部の四角で囲った領域に対して、それぞれの試料について 5 回測定を行い、解析
89 にはその平均スペクトルを用いた。なお、本研究での撮影時の明るさについては、スキャ
90 ンレート 100 line / sec, ゲイン 50 の一定条件で調整した。

91

92 2.3 ハイパースペクトル解析

93 ハイパースペクトル解析には、SAM (Spectral Angle Mapper) 解析を用いた。SAM 解析
94 は結果の物理的解釈が容易であること、バンド数 (測定できる波長の数) が多いハイパー
95 スペクトルデータに対しても計算負荷が小さいことから、ハイパースペクトルデータの解
96 析で広く用いられている^{15, 16)}。SAM 解析は、Fig.3 に示すように教師ベクトル s と対象
97 物の計測ベクトル x とのベクトル間の角度 θ から物質の同定を行う解析方法であり、スペ
98 クトル間の角度を類似度 a として(1)式のように定義される。本研究では、4 種類の鉄系腐

99 食生成物のハイパースペクトルに対して、2つの解析波長から教師ベクトルを決定し、こ
100 れを用いて未知の鉄系腐食生成物のベクトルとの類似度を求め、最も類似度が高い鉄さび
101 を未知の鉄さびと判別した。

$$102 \quad a = \cos\theta = \frac{x \cdot s}{|x||s|} \quad (1)$$

103

104 3. 結果と考察

105 3.1 既知の鉄系腐食生成物のハイパースペクトル

106 α -FeOOH, β -FeOOH, γ -FeOOH, Fe_3O_4 のハイパースペクトル測定結果を Fig.4 に示
107 す。それぞれの腐食生成物のスペクトル形状の特徴として、 α -FeOOH は 580 nm 付近と
108 760 nm 付近、 β -FeOOH は 740 nm 付近、 γ -FeOOH は 600 nm 付近と 790 nm 付近でそれぞ
109 れ反射率が高くなるスペクトルがみられた。一方、 Fe_3O_4 は黒色の腐食生成物であるため
110 か、特徴的な反射スペクトルはみられなかった。以上のように、それぞれの腐食生成物は
111 特徴的なスペクトルを示しており、ハイパースペクトル測定によって4種類の鉄系腐食生
112 成物の識別が可能であることがわかる。

113

114 3.2 SAM 解析における解析波長の検討

115 2.3 で示したように SAM 解析では2つの波長を用いて解析を行うため、それらの波長が
116 解析精度に影響を及ぼす可能性がある。そこで、SAM 解析を行うための最適な波長につい
117 て、マッピング画像における腐食生成物の識別精度により調査した。識別精度の調査に
118 は、マッピング画像内の色ごとのピクセル数をカウントできるビットマップ画像編集・加
119 工ソフトウェア (GIMP : GNU Image Manipulation Program) を用いた。Fig. 4 のハイパー
120 スペクトル測定結果から、解析波長の一つは3種類の FeOOH の反射率が最も低くなる 500
121 nm とした。もう一つの解析波長については、FeOOH がそれぞれ特徴的な反射率を示す
122 750nm から 800nm の範囲で 10nm ごとに最適値を調査した。

123 Fig. 5 に識別精度の結果として、 γ -FeOOH の例を示す。図中の円形部分が γ -FeOOH を堆積

124 させた部分であり、 α -Fe00H；青色， β -Fe00H；黄色， γ -Fe00H；赤色， Fe_3O_4 ；灰色として
125 識別されるように色の設定を行った。その他の腐食生成物についても同様に，750nm から
126 800nm の範囲で識別精度を計算した。その結果を Table3 に示す。 γ -Fe00H において，い
127 ゝれの解析波長でも 99%以上の識別精度となったが，750-770nm のときの識別精度が最も高
128 く，780nm 以上では識別精度は低下した。 Fe_3O_4 はどの解析波長においても識別精度がほ
129 とんど変化しなかったが， α -Fe00H， β -Fe00H は解析波長が 750 nm および 760 nm の時に
130 識別精度が高くなった。

131 Fig. 6 に解析波長が 750 nm と 800 nm の時の各鉄系腐食生成物のベクトルの傾きを示
132 す。 β -Fe00H は α -Fe00H と γ -Fe00H の間にあり，800nm の時には α -Fe00H に，750nm の時に
133 は γ -Fe00H に近くなる傾向がみられた。SAM 解析では，各ベクトル間の角度差が大きくな
134 れば，より識別精度が向上すると考えられることから，本研究においては，鉄系腐食生成
135 物の SAM 解析に用いる解析波長を 500 nm と 760 nm とした。

136

137 3.3 屋外暴露試験の結果

138 銚子試験場及び宮古島試験場で炭素鋼の直接および遮蔽暴露試験を行ったときの腐食減
139 量の経時変化を Fig.7 に示す。暴露試験期間が長くなるとともに腐食減量は増加し，腐食
140 環境の厳しい宮古島の方がその傾向が顕著であることが分かる。また，今回の暴露試験で
141 は，どちらの試験場においても 1 年目までは直接暴露試験での腐食減量が大きくなって
142 いた。直接暴露試験では，降雨により表面に付着した飛来海塩などの腐食性物質が洗い流さ
143 れる効果があることが知られているが¹⁷⁻¹⁹⁾，本研究での暴露試験期間においては 1 年目ま
144 では主に降雨や結露などの濡れによる腐食の影響が大きかったと考えられる。一方，1.5
145 年目以降では，遮蔽暴露試験での腐食減量が逆転し，大きくなっていった。海浜地域におけ
146 る遮蔽環境では，降雨などによる飛来海塩などの腐食性物質が洗い流されないために，表
147 面で海塩の蓄積が生じることが知られている。この場合，付着塩の吸湿により濃厚塩溶液
148 に長時間，さらされることになり腐食は大きく進行する。2.0 年から 2.5 年の遮蔽暴露試
149 験での腐食減量の変化が直接暴露試験と比較して非常に大きくなっており，これは付着塩

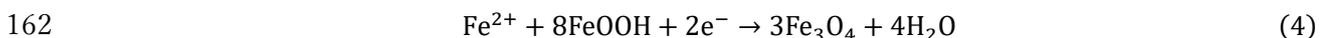
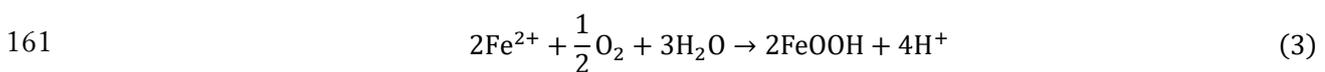
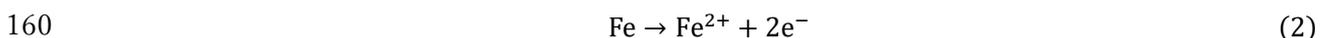
150 の蓄積による濡れ時間の増大が大きな要因として考えられる。

151

152 3.4 SAM 解析による暴露試験片に形成された腐食生成物の識別

153 銚子試験場および宮古島試験場で直接および遮蔽暴露試験を行ったすべての試験片につ
154 いて、ハイパースペクトルを測定し SAM 解析を行った。その二次元マッピングの例とし
155 て、1.5 年間暴露試験を行った試験片の結果を Fig. 8 に示す。銚子試験場、宮古島試験場
156 ともに、直接暴露試験片では全体的に γ -FeOOH が多く存在するのに対し、遮蔽暴露した試
157 験片では、主に Fe_3O_4 が検出されているのが分かる。

158 鉄の腐食生成物の成長については、Evans Model^{20, 21)} が提唱されており、このモデルに
159 よると、昼間の乾燥状態での腐食生成物は、主に FeOOH になると示されている。



163 一方、湿潤環境に置かれると腐食生成物の還元と、その対となる下地鉄の酸化が起こり、
164 下地鉄の酸化で生成した Fe^{2+} は FeOOH と反応して酸化数の低い鉄系酸化物に変化する。す
165 なわち、湿潤環境では上記(2)-(4)の反応により Fe_3O_4 が多く存在すると考えられる²²⁾。

166 海浜地域の遮蔽環境では飛来海塩等の腐食を誘発する物質の蓄積が生じ、それらの吸湿に
167 より試験片は長時間、湿潤環境にさらされると考えられることから、Fig. 8 に示した鉄系
168 腐食生成物の検出結果は妥当な結果といえる。

169

170 3.5 腐食生成物の表面存在割合と腐食変化量との関係

171 腐食状態から腐食を予測するためには、腐食評価によるパラメータと腐食変化量との相
172 関を調査する必要がある。表面に形成される腐食生成物は、それまでの腐食挙動の結果で
173 あるとともに、その後の腐食特性にも影響を及ぼすと考えられる。山下ら^{23, 24)} は、耐候
174 性鋼に形成されるさび層の保護性能を定量的に評価する手法として、内部標準定量 X 線回
175 折法で分析されたさび中の α -FeOOH と γ -FeOOH の質量比を α/γ 値として指標化し、この値が

176 2 を超えると保護的に働くさびと診断する方法を提案している。また、 α/γ 値について
177 は、海浜地域で生ずる層状剥離さびにおいても α/γ 値が高い値を示す場合があり、指標と
178 して α/γ^* 値($\gamma^* = \gamma\text{-Fe00H} + \beta\text{-Fe00H} + \text{Fe}_3\text{O}_4$)に修正されている²⁵⁾。

179 Fig. 9 に、SAM 解析による各腐食生成物の表面存在割合とその後の1年間の腐食変化量
180 との関係を示す。本研究の暴露試験では0.5年ごとに腐食試験片のサンプリングを行って
181 いるが、腐食変化量を0.5年ごとで考えた場合、腐食挙動に対する季節の影響が出てしま
182 う可能性があるため、1年後の腐食変化量を用いた。例えば、0.5年間暴露試験した試験
183 片のハイパースペクトル解析による腐食生成物の表面存在割合に対して、腐食変化量に
184 は、0.5年目の腐食減量と1.5年目の腐食減量との差を用いた。

185 $\gamma\text{-Fe00H}$ と Fe_3O_4 については、検出された $\gamma\text{-Fe00H}$ と Fe_3O_4 の表面存在割合と腐食変化量
186 にほとんど相関が見られず、腐食を予測するための指標としては適していないことがわか
187 った。しかしながら、Fig. 8 ですでに示しているとおおり、 $\gamma\text{-Fe00H}$ は主に直接暴露試験し
188 た試験片で、 Fe_3O_4 は主に遮蔽環境にさらされた試験片で検出されており、湿潤環境に長
189 くさらされていたなど定性的ではあるが、 $\gamma\text{-Fe00H}$ と Fe_3O_4 の表面存在割合によって環境
190 側の有用な情報を得ることができる可能性が示された。

191 $\alpha\text{-Fe00H}$ については、腐食変化量と正の相関が認められた。一般に、 $\alpha\text{-Fe00H}$ は熱力学
192 的に安定な腐食生成物として知られており²⁵⁾、耐候性鋼では、 α/γ や α/γ^* による腐食生成
193 物の保護性能の有用性が示されている。これは、腐食生成物内の $\alpha\text{-Fe00H}$ の割合が大き
194 くなると腐食生成物の保護性が高くなり、腐食が抑制されることを意味する。しかしなが
195 ら、耐候性鋼のさび層の構造は外層と内層の2層構造になっているのに対し、炭素鋼の場
196 合、 Fe00H と Fe_3O_4 が混在していることが報告されており²⁶⁾、耐候性鋼と同様には整理で
197 きないと考えられる。腐食生成物の表面に存在する $\alpha\text{-Fe00H}$ が耐食性に対してマイナスに
198 働く可能性としては、その微細構造による結露や毛細管凝縮のしやすさがあげられる。
199 OKADA ら²⁷⁾は、メスバウア分光測定により大気腐食で形成される $\alpha\text{-Fe00H}$ の粒子サイズは
200 非常に小さいことを報告している。結露や毛細管凝縮のしやすさについては、(5)式に示
201 すように、曲率のない通常の液面上の蒸気圧(P_0)に比べ、凹面をもつ液面上の蒸気圧(P)

202 は小さいことが知られており、曲率の小さな細孔があるほど飽和蒸気圧は小さくなり、湿
203 度が 100%にならなくても水の凝縮が生じる²⁸⁾。

$$204 \quad \log_{10} \frac{P}{P_0} = \frac{-2\sigma V}{rRT} \quad (5)$$

205 ここで σ は表面張力、 V は分子容、 r は毛管の半径、 R は気体定数、 T は絶対温度である。
206 したがって、微細構造をもつ α -FeOOH が表面に存在する場合、毛細管凝縮を生じやすくな
207 る可能性がある。

208 一方、 β -FeOOH については、**表面存在割合**が大きくなるほど腐食変化量が小さくなる傾
209 向を示した。一般に、 β -FeOOH は非常に飛来海塩粒子が多く腐食が厳しい環境下で生成さ
210 れる腐食生成物として認識されており²⁹⁾、腐食量と β -FeOOH は比例すると考えられてい
211 る。しかしながら、Fig. 9 の結果はそれとは逆の傾向を示した。この結果については、篠
212 原ら³⁰⁾も宮古島試験場で直接暴露試験を行った Fe-Ni 合金について、さびの X 線定量分
213 析から β -FeOOH 生成量の増加とともに腐食減量が減少することを示している。この理由と
214 して、 β -FeOOH はその結晶を構成する $\text{FeO}_3(\text{OH})_3$ 8 面体のネットワーク間に Cl^- を含有する
215 ³¹⁾ことが知られており、塩化物イオンの固定化²²⁾などにより内部への Cl^- の浸透が抑制さ
216 れ、その後の腐食の進行を抑えるように機能したのではないかと考えられる。

217 以上のように、ハイパースペクトルの SAM 解析から 4 種類の腐食生成物に識別し、 α -
218 FeOOH や β -FeOOH の**表面存在**割合が腐食変化量と相関があることを示した。しかしなが
219 ら、SAM 解析では、類似度の高さで腐食生成物を識別してしまうため類似度が 1 以外は、
220 それに近い腐食生成物と識別することになる。この手法でもある程度の識別率は維持でき
221 ると考えられるが、さらなる識別率の向上のためには、腐食生成物を混合したサンプルで
222 の教師スペクトルデータの蓄積、別の解析手法の検討などが今後の課題である。

223

224 4. 結言

225 本研究では、鉄鋼材料の表面の情報からその後の腐食リスクを予測するツールとしてハイ
226 パースペクトルに着目し、屋外で腐食試験した炭素鋼についてハイパースペクトル解析

227 を行い、形成された腐食生成物を識別した。さらに、その表面存在割合と腐食変化量との
228 関係を調査した結果、以下のことがわかった。

229 1) ハイパースペクトルの SAM 解析によって、炭素鋼表面に形成された腐食生成物の識
230 別割合の評価が可能である。

231 2) 直接暴露試験を行った試験片では主に γ -FeOOH、遮蔽環境にさらされた試験片では
232 主に Fe₃O₄ が検出された。

233 3) 1 年間の腐食変化量に対し、 α -FeOOH の表面存在割合は正の相関、 β -FeOOH の表面
234 存在割合は負の相関がある。

235 4) 炭素鋼の腐食リスクの予測技術として、ハイパースペクトルによる表面外観測定
236 の有用性が確認された。

237

238 謝辞

239 本研究は、日本鉄鋼協会研究会 I 「インフラ劣化診断のためのデータサイエンス研究
240 会」からの支援により遂行されたものである。ここに謝意を表する。

241

242 文献

243 1) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Government of Japan: Document of
244 Cabinet Office, (Promotion for preventive maintenance countermeasures of ageing
245 infrastructures), (November 5, 2020), [https://www5.cao.go.jp/Keizai-](https://www5.cao.go.jp/Keizai-shimon/kaigi/special/reform/wg6/20201110/pdf/shiryu1-1.pdf)
246 [shimon/kaigi/special/reform/wg6/20201110/pdf/shiryu1-1.pdf](https://www5.cao.go.jp/Keizai-shimon/kaigi/special/reform/wg6/20201110/pdf/shiryu1-1.pdf), (accessed 2024-04-19) (in
247 Japanese).

248 2) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Government of Japan: Document of
249 Cabinet Office, (Guidelines for periodic inspection of road bridges), (February, 2019),
250 https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo4_1.pdf, (accessed 2024-04-19) (in
251 Japanese).

252 3) K. Y. Choi and S. S. Kim: *Corros. Sci.*, 47(2005), 1. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2004.05.007>

- 253 4) F. F. Feliciano, F. R. Leta and F. B. Mainier: *Corros. Sci.*, 93(2015), 138.
254 <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2015.01.017>
- 255 5) T. Hagiwara, Y. Shimamoto, T. Suzuki, N. Otaka and Y. Fujimoto: *IDRE Journal*, 88(2020), 145
256 (in Japanese). https://doi.org/10.11408/jsidre.88.I_145
- 257 6) S. Ono: *IEICE ESS Fundamentals Review*, 14(2020), 138 (in Japanese).
258 https://doi.org/10.1587/essfr.14.2_138
- 259 7) J. Arita, T. Endo, K. Okuyama, S. Ochi and Y. Yasuoka: *SEISAN KENKYU*, 53(2001), 615 (in
260 Japanese). <https://doi.org/10.11188/seisankenkyu.53.615>
- 261 8) T. Nakajima, T. Endo and Y. Yasuoka: *SEISAN KENKYU*, 56(2004), 190 (in Japanese).
262 <https://doi.org/10.11188/seisankenkyu.56.190>
- 263 9) D. B. Siano, W. Abdullakasim, A. Terdwongworakul and K. Phuangsombut: *Sens. Bio-Sens.*
264 *Res.*, 33(2021), 1. <https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2021.100441>
- 265 10) H. P. Sato, S. Miyasaka, H. Makita, H. Yagi, M. Korai: *J. of JSPRS*, 45(2006), 32 (in Japanese).
266 https://doi.org/10.4287/jsprs.45.5_32
- 267 11) Y. Morikawa and I. Furukawa: *Res. Bull. Tottori Univ For.*, 24(1996), 55 (in Japanese).
- 268 12) Iris Co.: Report for Quality management, https://hokkaido-sat.co.jp/quality_management,
269 (accessed 2023-12-22) (in Japanese).
- 270 13) Ryo Kobayashi, Hideki Katayama, Takaya Akashi: *Zairyo-to-Kankyo*, 70(2021), 354 (in
271 Japanese). <https://doi.org/10.3323/jcorr.70.354>
- 272 14) JIS Z 2381: 2017, General requirements for atmospheric exposure testing (in Japanese).
- 273 15) Yasushi YAMAGUCHI: *J. Rem. Sens. Soc. Jpn*, 39(2019), 241 (in Japanese).
274 <https://doi.org/10.11440/rssj.39.241>
- 275 16) Y. Amano and N. Takagi: *J. Environ. Eng.*, 70(2005),49 (in Japanese).
276 https://doi.org/10.3130/aije.70.49_1
- 277 17) T.Shinohara: *J. Surf. Sci. Soc. Jpn.*, 36(2015), 4 (in Japanese). <https://doi.org/10.1380/jsssj.36.4>
- 278 18) S.Hara, M.Miura, Y.Utsumi, T.Fujiwara and M.Yamamoto: *Zairyo-to-Kankyo*, 54(2005), 344

279 (in Japanese). <https://doi.org/10.3323/jcorr1991.54.344>

280 19) M.Takeba, M.Ohya, R.Adachi, S.Ajiki, J.Ota, R.Gan-ei, N.Kiatagawa, T.Furukawa,
281 Y.Matsuzaki and T.Aso: *Zairyo-to-Kankyo*, 57(2008), 188 (in Japanese).
282 <https://doi.org/10.3323/jcorr.57.188>

283 20) U. R. Evans: *Corros. Sci.*, 9(1969), 813. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(69\)80074-0](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(69)80074-0)

284 21) U. R. Evans and A. A. J. Taylor: *Corros. Sci.*, 12(1972), 227. [https://doi.org/10.1016/S0010-](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(72)90671-3)
285 [938X\(72\)90671-3](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(72)90671-3)

286 22) T. Ohtsuka: 211st and 212nd Nishiyama Memorial Seminar, ISIJ, Tokyo, (2012), 8 (in
287 Japanese).

288 23) M. Yamashita, H. Miyuki, H. Nagano and T. Misawa: *Zairyo-to-Kankyo*, 43(1994), 26 (in
289 Japanese). <https://doi.org/10.3323/jcorr1991.43.26>

290 24) M. Yamashita, H. Miyuki and H. Nagano: *Sumitomo Met.*, 47(1995), 4 (in Japanese).

291 25) T. Kamimura, M. Yamashita, H. Uchida, H. Miyuki: *J. Jpn. Inst. Metals and Materials*,
292 65(2001), 922 (in Japanese). https://doi.org/10.2320/jinstmet1952.65.10_922

293 26) H. Okada, Y. Hosoi, K. Yukawa, H. Naito: *Tetsu-to-Hagané*, 55(1969), 355 (in Japanese).
294 https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.55.5_355

295 27) T. Okada, Y. Ishii, T. Mizoguchi, I. Tamura, Y. Kobayashi, Y. Takagi, S. Suzuki, H. Kihira, M.
296 Itou, A. Usami, K. Tanabe and K. Masuda: *Jpn. J. Appl. Phys.*, 39(2000), 3382.
297 <https://doi.org/10.1143/JJAP.39.3382>

298 28) I. Matsushima: *J. Jpn. Soc. Colour Mat.*, 49(1976), 669 (in Japanese).
299 <https://doi.org/10.4011/shikizai1937.49.669>

300 29) T. Misawa: *CORROSION ENGINEERING*, 32(1983), 657 (in Japanese).
301 https://doi.org/10.3323/jcorr1974.32.11_657

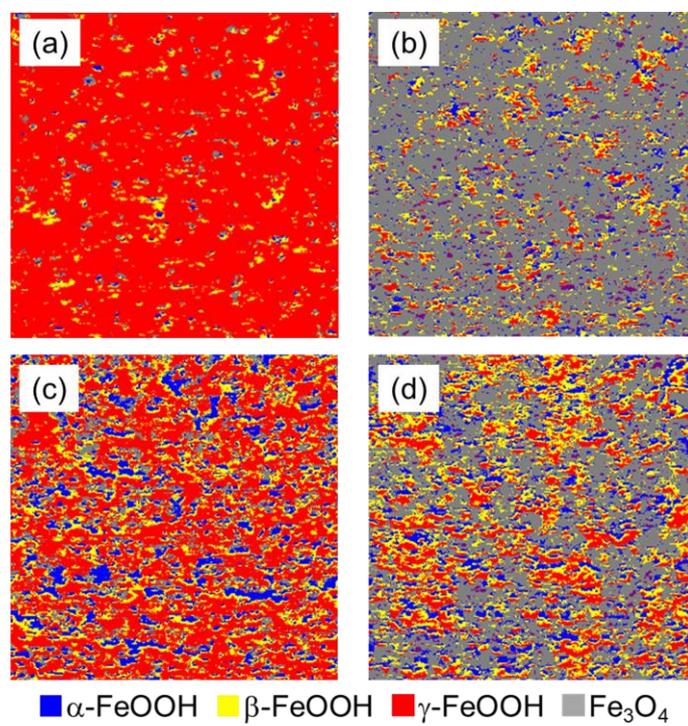
302 30) National Institute for Materials Science: NIMS Materials Data Sheet Technical Document
303 No.18, NIMS, Tsukuba, (2006), 55 (in Japanese).

304 31) U. Schwertmann and R. M. Cornell: *Iron Oxides in the Laboratory*, Wiley-VCH, Weinheim,

305 (2000), 1.

306

307



Graphical Abstract

310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333

Table 1 Chemical compositions (mass%) of specimens.

C	Si	Mn	P	S	Fe
0.17	0.02	1.07	0.013	0.003	Balance

(mass%)

334

335

336

337 Table 2 Average values of environmental data during exposure tests at Choshi and Miyakojima
338 test sites.

	Choshi	Miyakojima
Ave. Air Temp. (°C)	16.8	24.4
Ave. RH (%)	78.4	83.3
Monthly Precipitation (mm)	162.1	178.7
Chloride deposition Rate (mg NaCl/(m ² ·d))	15.8	34.1

339

340

341

342

343

344

345

346

347

348

349

350

351

352

353

354

355

356

357 Table 3 Identification fraction of corrosion products by SAM analysis using each wavelength.

	750	760	770	780	790	800
α -FeOOH	94.3	93.3	92.6	92.4	92.2	92.0
β -FeOOH	99.9	99.9	99.9	99.6	98.5	97.4
γ -FeOOH	99.9	99.9	99.9	99.6	99.2	99.2
Fe_3O_4	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9

358

(%)

359

360

361

362

363

364

365

366

367

368

369

370

371

372

373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398

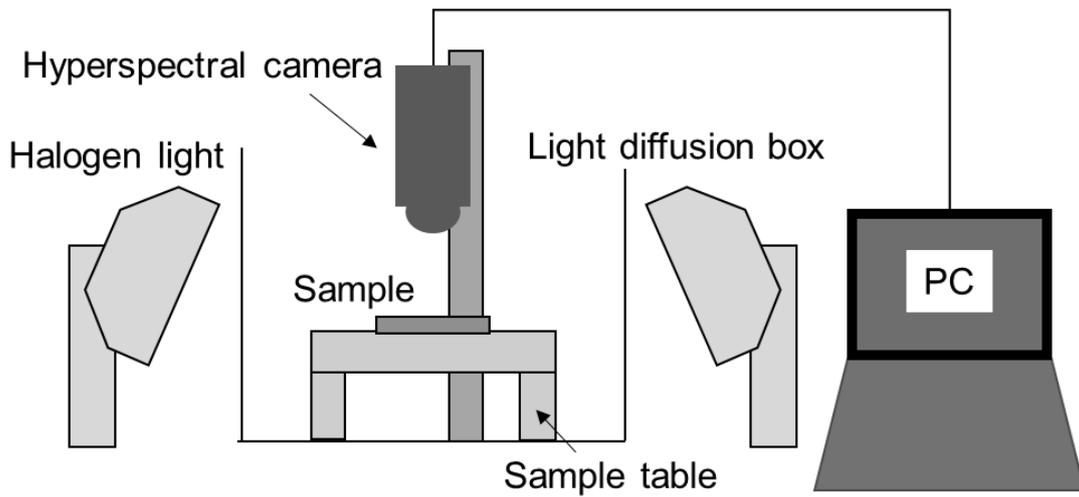


Fig.1 Scheme of the hyperspectral measurement system.

399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424

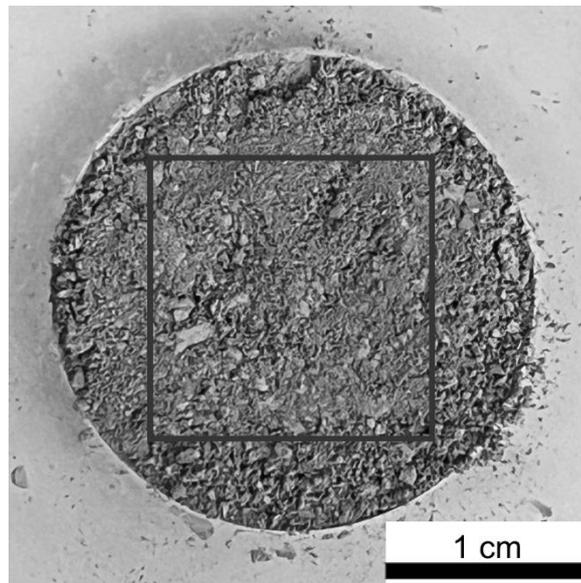


Fig.2 Hyperspectral measurement area.

425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450

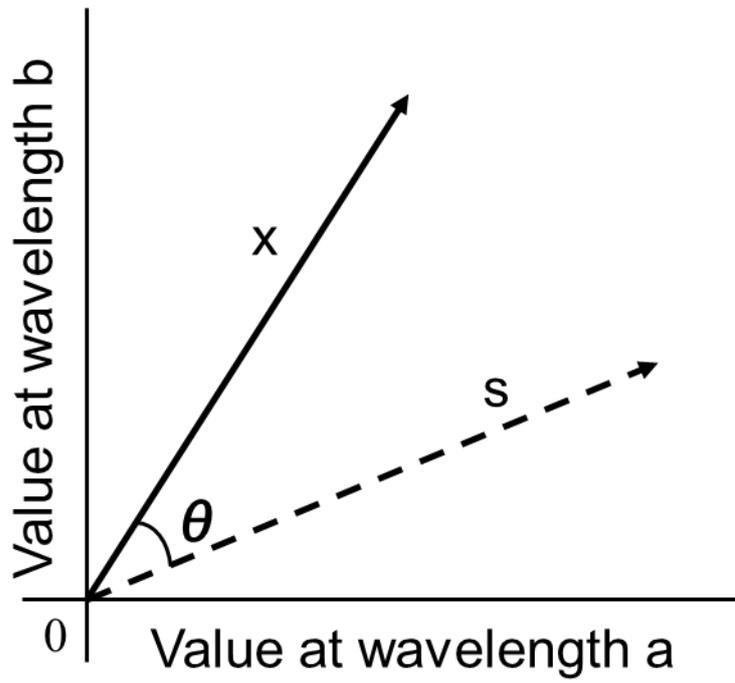


Fig.3 Conceptual diagram of SAM.

451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476

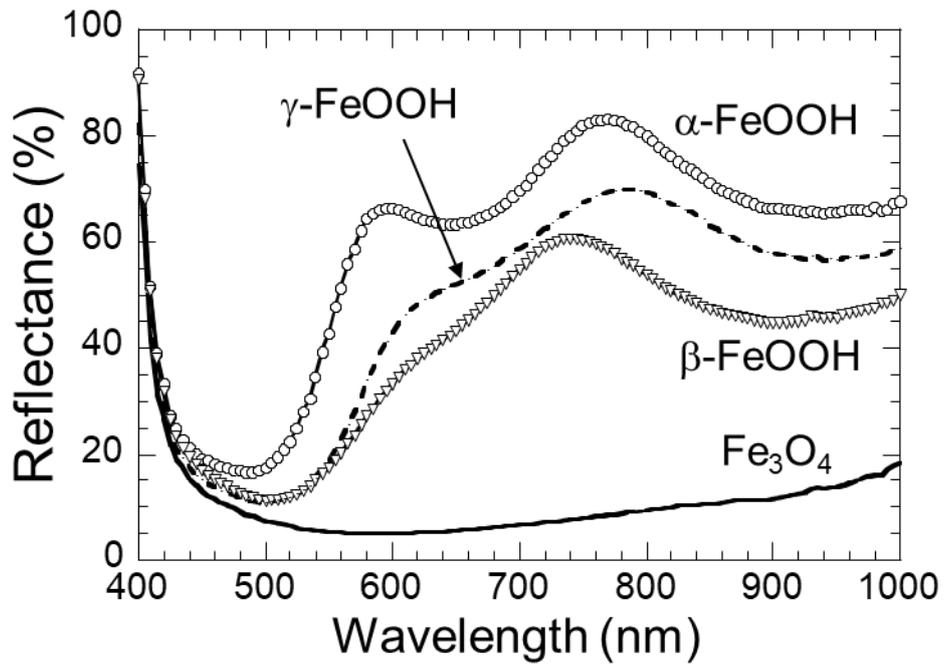


Fig.4 Reflection spectra of α -FeOOH, β -FeOOH, γ -FeOOH and Fe_3O_4 using hyperspectral camera.

477

478

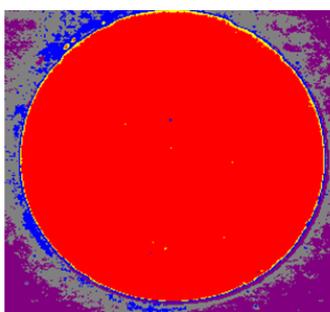
479

480

481

482

750 nm



483

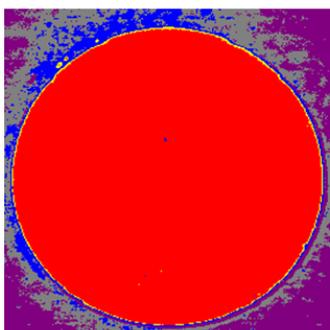
484

485

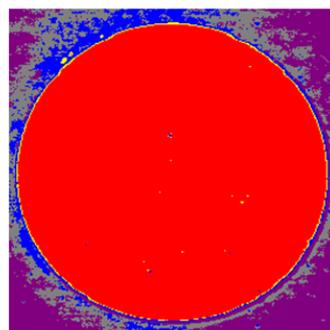
486

487

760 nm

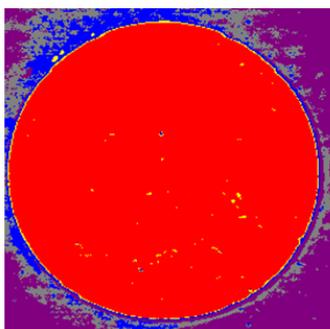


770 nm



488

780 nm



489

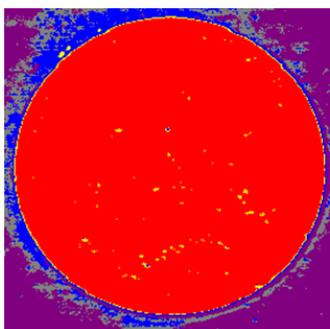
490

491

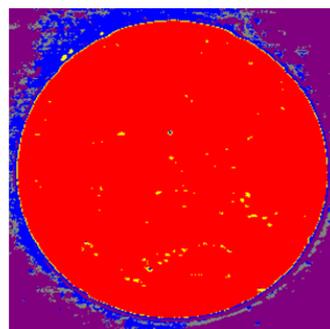
492

493

790 nm



800 nm



494

495 Fig.5 Identification fraction of γ -FeOOH by SAM analysis using each wavelength; α -FeOOH;

496 blue, β -FeOOH; yellow, γ -FeOOH; red, Fe₃O₄; gray. **(color in print)**

497

498

499

500

501

502

503

504

505

506

507

508

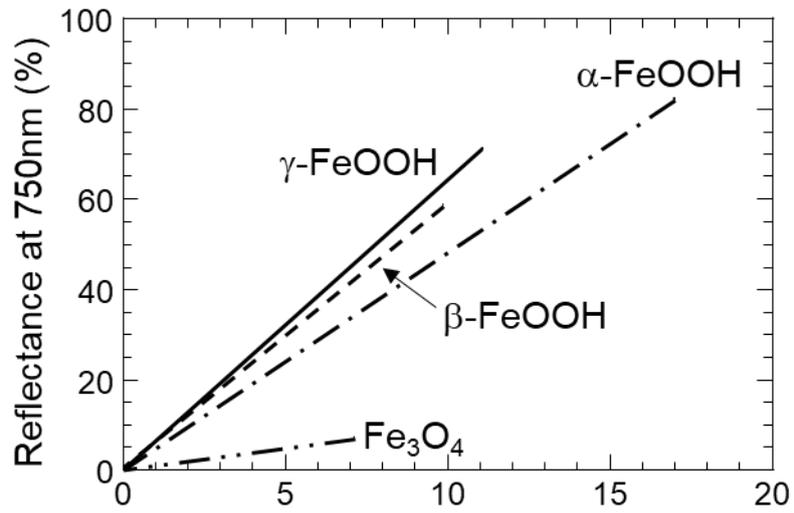
509

510

511

512

513



514

515

516

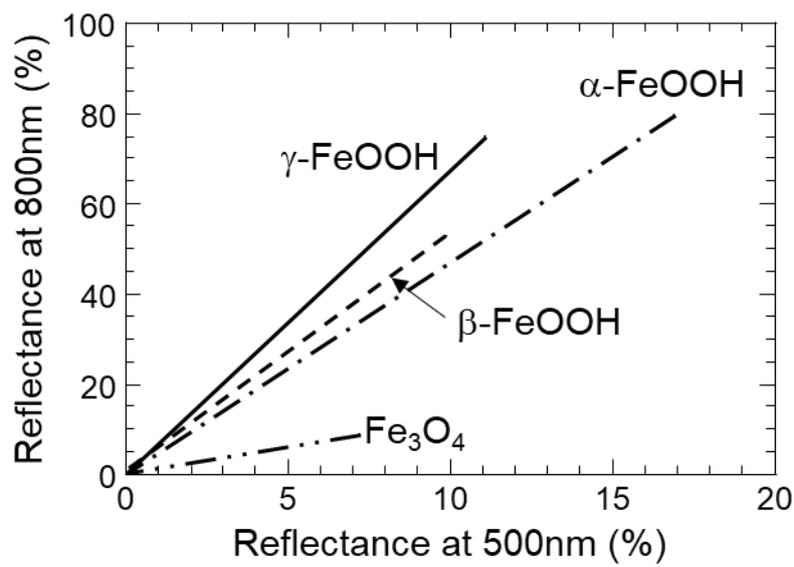
517

518

519

520

521



522

523

524

Fig.6 SAM classification for each iron corrosion product.

525

526

527

528

529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554

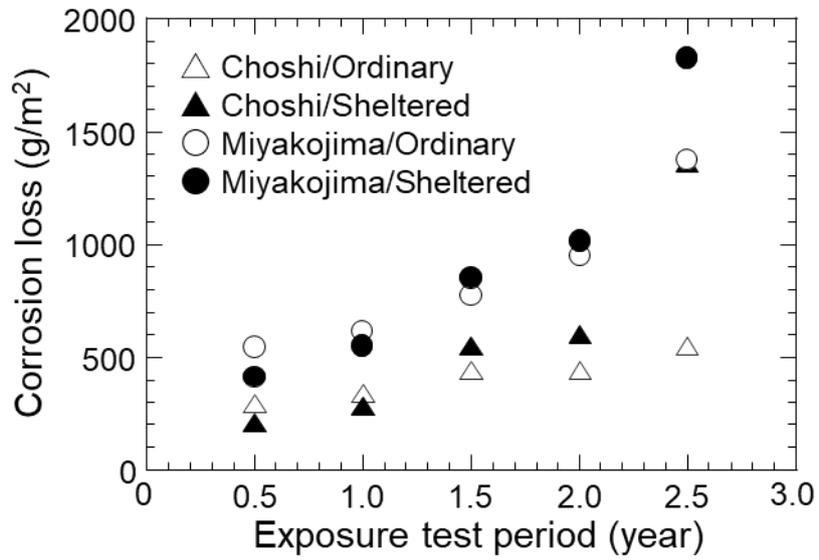


Fig.7 Change over time of corrosion loss of carbon steels exposed to ordinary and sheltered environments at Choshi and Miyakojima test sites.

555

556

557

558

559

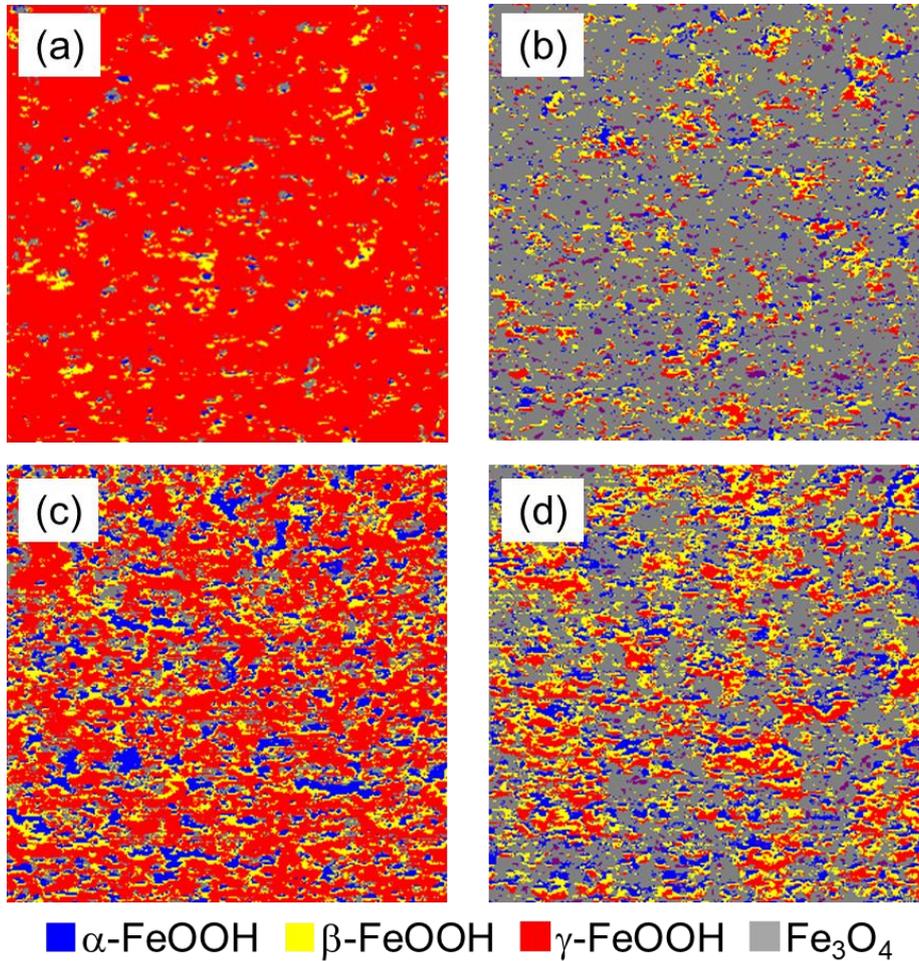
560

561

562

563

564



565

566

567

568

569

570

571

572

573

574 Fig.8 Two-dimensional mapping by SAM analysis for specimens exposed to outdoor
575 environment for 1.5 years. (a) Ordinary exposure test at Choshi, (b) sheltered exposure test at
576 Choshi, (c) ordinary exposure test at Miyakojima and (d) sheltered exposure test at Miyakojima.

577 **(color in print)**

578

579

580

581

582

583

584

585

586

587

588

589

590

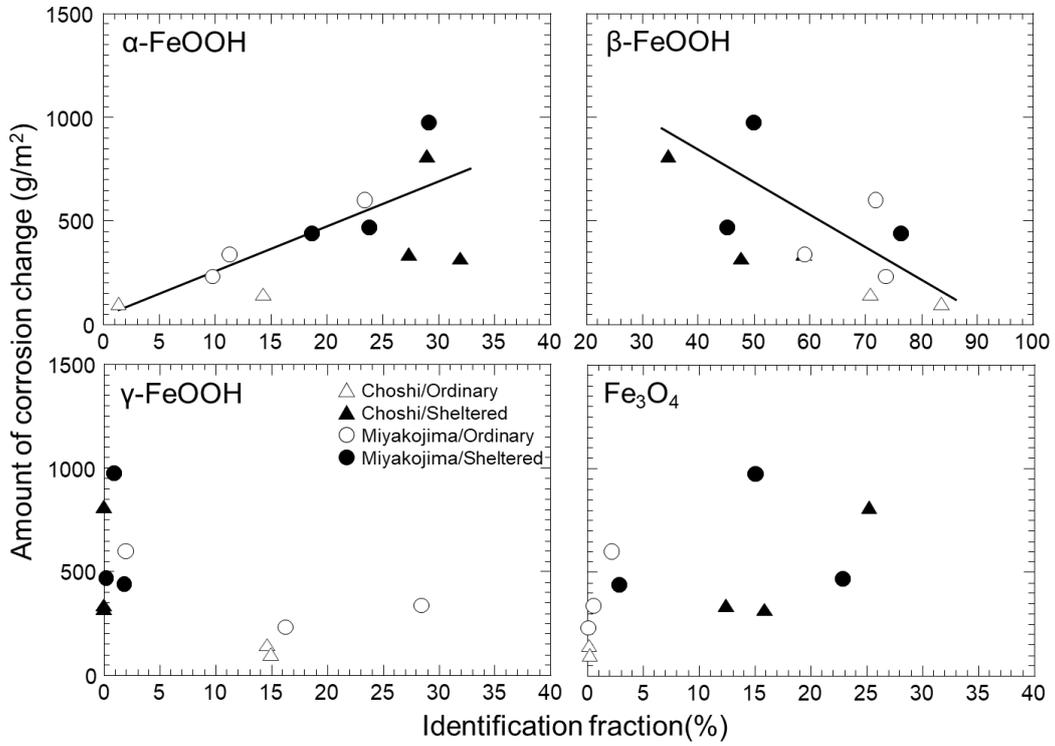
591

592

593

594

595



596 Fig.9 Relationship between the identification fraction of each corrosion product by SAM analysis

597 and the change of corrosion loss over a year.

598

599

600