鋼製杭の浅層土壌中における暴露試験

藤橋健太^{1)*}, 奥地 誠¹⁾, 押川 渡²⁾, 田原 晃³⁾,
篠原 正⁴⁾, 片山英樹⁴⁾

¹⁾ 奥地建産株式会社

²⁾ 琉球大学 工学部 工学科 エネルギー環境工学コース

³⁾ 公益社団法人腐食防食学会

⁴⁾ 物質・材料研究機構 構造材料研究拠点 腐食特性グループ

Exposure Corrosion Test of Metal Pile for Shallow Soil Layer

Kenta Fujihashi^{1)*}, Makoto Okuji¹⁾, Wataru Oshikawa²⁾, Akira Tahara³⁾,
Tadashi Shinohara⁴⁾ and Hideki Katayama⁴⁾

¹⁾ Okuji-Kensan Corporation

²⁾ Energy and Environment Program, School of Engineering, Faculty of Engineering, University of the Ryukyus

³⁾ Japan Society of Corrosion Engineering

⁴⁾ Corrosion property group, Research Center for Structural Materials, National Institute for Materials Science

*責任著者 (Corresponding Author) 〒 541-0054 大阪市中央区南本町 4-1-8 (4-1-8 Minamihommachi, Chuo-ku, Osaka, 541-0054, Japan)
E-mail: k_fujihashi@okuji.co.jp

The number of photovoltaic system has increased drastically due mainly to a profitable selling price of electricity for owners set by feed-in tariff. Metal piles are currently used as typical foundation of the system from the viewpoint of high workability and low cost. However, there is a problem that the corrosion rate of metal foundation pile at ground level is faster than that of other part of the pile. In this paper, soil corrosion at shallow layer was investigated by exposure test in soil, chemical analysis of soil and electrochemical analysis. The corrosion rate of metal pile in shallow soil layer was higher than 0.02 mm/year which is commonly recognized as the corrosion rate of metal in soil. The corrosion rate in shallow soil layer mostly increased with decreasing the polarization resistance measured in soil environment. Those investigated results showed that the macro cell corrosion at ground level is thought to be attributed to change of chemical composition caused by land creation and dispersion of manure.

Key words : soil corrosion, macro cell corrosion, ground level, exposure test, passivity film, AC impedance method

1. 緒 言

我が国では再生可能エネルギー固定買取制度を背景に太陽光発電設備が急増した。太陽光発電設備の基礎構造は、かつて鉄筋コンクリートによる直接基礎が主流であったが、より安価で施工性の高い鋼製杭基礎へと変化してきた。ここで用いられる鋼製杭は、かねてより建築や土木分野で用いられている鋼製杭とは大きく異なる。建築や土木分野で用いられる鋼製杭は、フーチングなどの鉄筋コンクリートの基礎を支える目的で土壌中に完全に埋設されており、杭表面が大気にさらされることは少ない。そのため、鋼製杭の腐食速度は土壌によらず年間0.02 mmと言われる¹⁾。

それに対し、太陽光発電設備における鋼製杭は、地盤に直接打ち込む工法が一般的に採用されており、杭上部が大気中に突出している。また地際部、浅層土壌中においては、雨水の滞留などが見られる。そのため土壌の通気性、地下水による酸素濃淡電池の形成や、土壌中の腐食²⁾⁻⁴⁾において確認されている微生物などによる局所的

に大きな腐食⁵⁾の発生が懸念される。

しかし、浅層土壌中に金属表面が接し、地際部より突出しているこのような環境における腐食の知見は少なく、データの蓄積、解析が必要である。そのため、地際部から浅層土壌中にかけての腐食量を測定することを目的に2016年5月より、全国3箇所での杭状サンプルの暴露試験を開始した。本報では、暴露1年目の結果を報告し、各暴露試験場の浅層土壌を回収、分析することで腐食要因の検討を行った。

2. 実 験 方 法

2.1 暴露試験場

本暴露試験は三重県伊賀市(以下伊賀, Iga)、奈良県葛城市(以下葛城, Katsuragi)、沖縄県西原町(以下西原, Nishihara)の3箇所で行った。これらの暴露試験場は飛来海塩粒子量が土壌中腐食へ与える影響と地下水位の影響を検証することを考慮して選定した。暴露期間における飛来海塩粒子量は、伊賀が0.02 mg/dm²/day、西原が0.17 mg/dm²/dayとなり、大きな差があるため、飛来海塩粒子量が土壌中腐食へ与える影響を検証することを目的に選定した。また、葛城については、地下水位

が高く、周辺に水田が広がっているため、土壌はほぼ湿潤状態である。港湾施設における鋼製杭、鋼矢板の腐食は、干潮時水位の直下がアノードとなりマクロセル腐食が発生することが示されている⁶⁾ため、土壌中でもマクロセル腐食の発生を考慮し、選定した。

2.2 暴露試験体

土壌の通気性の違いや土壌層の変化により、深さ方向で腐食の傾向が異なることが予想されたため、Fig. 1(a)のような試験杭を作製し、深さ方向 50 mm ごとに腐食減量を測定した。試験杭は全長 1,800 mm、 $\phi 35$ mm であり、腐食減量を測定するための円筒形試験片 (Fig. 1(b)) を 30 体取り付け付けた。腐食減量の測定範囲は 1,500 mm である。試験杭と円筒形試験片の材質は炭素鋼 (S45C) とし、そのミルシートの抜粋とサイズを Table 1 に示した。また、円筒形試験片の内面と上下面には低温黒色クロムめっきを施し、主に外表面が腐食するようにした。試験杭に取り付けられた円筒形試験片は全て電氣的にショートさせ、マクロセル腐食による減量も測定できるようにした。

この試験杭を 2016 年 5 月に各暴露試験場に打ち込み、約 1 年間暴露した。伊賀、葛城については、腐食減量の測定範囲が大気中に約 300 mm、土壌中に約 1,200 mm となるように打ち込んだ。西原については、腐食減量の測定範囲が大気中に約 600 mm、土壌中に約 900 mm となるように打ち込んだ。

2.3 腐食減量測定

円筒形試験片の除錆処理は、インヒビターを添加した

塩酸除錆液に全体を浸漬させて行った。しかし、この除錆液では、内面の低温黒色クロムめっきも溶解するため、あらかじめ円筒形試験片のブランク材 3 体を同様の除錆液に浸漬し、処理を行って算出した平均めっき質量を考慮して腐食減量を算出した。

2.4 土壌回収

腐食の要因を考察する目的で、各暴露試験場から層ごとに土壌を 2017 年 7 月に回収した。表層 20 mm から 50 mm 程度を除き、そこから深度 50 mm ごとに 1,000 mm 四方の穴から回収した。伊賀、西原については、深度 500 mm まで回収したが、葛城のみ深度 280 mm 程度から水が湧き上がり、回収が困難となった。その場で外観により分類すると Fig. 2 のようになった。伊賀は深度約 500 mm までの範囲で、三つの層があり、全ての層で砂利を多く含んでいた。葛城は深度約 300 mm までの範囲で、四つの層があり、非常に薄い層が多かった。もとの水田と思われる土は 3 層目からであり、4 層目では水が湧き出し、掘り進むことが困難となった。西原は深度約 500 mm までの範囲で、均一な単層であった。

2.5 土壌の成分分析

外観により分類した層ごとに土壌の成分分析を行った。西原の土壌のみ単層であったが、深度 0 mm から 50 mm の土壌と 250 mm から 300 mm の土壌の 2 種を分析したため合計 9 土壌を分析対象とした。

分析は細粒分測定、蛍光 X 線分析 (リガク社製 ZSX Primus II) による半定量分析、土壌抽出液の pH 測定 (HORIBA 製 F-21)、イオンクロマトグラフ法によるイオ

Fig. 1 Schematic drawings of (a) pile and (b) test piece for exposure test

Table 1 Chemical composition and size of exposure test piece

Chemical composition [mass%]						Size		
C	Si	Mn	P	S	Fe	Outside diameter [mm]	Inside diameter [mm]	Height [mm]
0.46	0.21	0.65	0.008	0.018	bal.	35	24	50

Fig. 2 Soil type at each depth of shallow layer at Iga, Katsuragi and Nishihara test sites

ン濃度分析(DIONEX 製 ICS-1100)を行った。細粒分は目開き $75\ \mu\text{m}$ のメッシュを通った土壌の重量割合を示し、土壌抽出液は、それぞれの土壌 $75\ \text{g}$ を量り取り、超純水 $150\ \text{ml}$ を加え、20分振とう後、ろ紙でろ過して作製した。

2.6 土壌を電解質とした交流インピーダンス測定

2.6.1 測定セルの作製

各暴露試験場で回収した土壌を 110°C の定温乾燥器(アズワン社製 EO-450B)内で完全乾燥させ、ミル(ラボネクト社製 HS20)で粉碎後、目開き $1\ \text{mm}$ のメッシュに通した。メッシュを通過した土壌に、その重量に対して $15\ \text{wt}\%$ の純水を添加し、よく攪拌することで試験土壌とした。この純水の添加量については、事前に行った予備実験において、細粒分が異なると土壌の保水性が大きく異なり、電気化学測定ができない場合があることが判明した。そのため細粒分が大きく異なっているにもかかわらず測定が可能であった $15\ \text{wt}\%$ とした。

ANSI⁷⁾で示される土壌の腐食性を抵抗値によって評価する方法を参考に Fig. 3 で示すアクリル製の測定セルボックスを作製した。このセルボックスの底となる炭素鋼(SPCC)電極と電極の切欠から参照電極用の塩橋を取り付け、試験土壌を4回から5回に分けて入れた。試験土壌を1回入れるごとに自作ランマー(重量: $1,439\ \text{g}$, 先端: $\phi 20\ \text{mm}$)で締固めた。そして蓋となる白金電極を上置き、ボルトで電極を土壌に圧着して測定セルとした。

2.6.2 交流インピーダンス測定

2.6.1 で作製した測定セルを3電極法による交流インピー

Fig. 3 Schematic drawing of measuring equipment

Fig. 4 Equivalent circuit of measuring equipment

ダンス測定を行った。本実験における測定セルの等価回路と模式図を Fig. 4 に示す。測定は 25°C , $95\%\text{RH}$ の恒温恒湿槽(ESPEC 製 LHL-114)内に30分静置した後に、交流インピーダンス測定を行った。測定装置はポテンショスタット(東方技研製 PS-08)と周波数特性分析器(NF回路設計ブロック製 FRA5022)を用い、測定周波数範囲は $100\ \text{kHz}$ から $1\ \text{mHz}$, 交流振幅を $10\ \text{mV}$ で測定を行った。これらの結果から土壌抵抗(R_{soil}), 分極抵抗(R_p)を決定し、土壌の腐食性を評価した。

3. 結果および考察

3.1 各深度の腐食減量測定結果

各暴露試験場における各深度の腐食減量測定結果を Fig. 5 に示す。土壌中における腐食は年間 $0.02\ \text{mm}$ と言われるが、全体的に上回っているプロットが多く、伊賀の浅層土壌中では最大で年間 $0.04\ \text{mm}$ 程度の腐食をすることが分かった。

伊賀と西原を比較すると、大気中における腐食減量は西原のほうが大きい。土壌中では伊賀のほうが大きくなった。浅層土壌中では飛来海塩粒子が堆積し、濃度が高まり、特に地際部で腐食が大きく進行することが予想されたが、この結果から土壌腐食に対する大気の影響は小さいと考えられる。

Fig. 6 に葛城における暴露した試験杭の腐食外観と円筒形試験片の代表的な腐食外観を示す。この円筒形試験片の内面と上下面には低温黒色クロムめっきを施したが、土壌中の円筒形試験片の外表面(Fig. 6(b), (c), (d))は一樣に腐食している。このことから低温黒色クロムめっきと土壌は接触しておらず、低温黒色クロムめっきは、円筒形試験片の外表面の腐食に影響していないと判断した。

Fig. 5 Relationship between corrosion rate and depth from ground level at each site

Fig. 6 Appearance of test pile and test pieces exposed for one year at Katsuragi in (a) air, (b) soil (Shallow layer), (c) soil (Middle layer) and (d) soil (Deep layer)

地際部直下(Fig. 6(b))では、腐食減量は葛城において最も大きい値を示し、外観も腐食による減耗が、その他の深度と比較して大きいように見える。そして、減耗の大きい領域のすぐ下、深度 125 mm から 250 mm では金属色を示し、点錆も見られない(Fig. 6(c))。このことから、地下水位が高く、土壌もほぼ湿潤状態にあるような土壌環境では、地際部直下をアノード、金属色を示した部分をカソードとしたマクロセル腐食の発生が考えられる。これは、海洋環境での鋼の腐食における干潮時水位の直下の腐食極大⁶⁾と類似しているが、点錆もない金属色を残すことについては説明できなかった。

3.2 土壌の成分分析結果

そこで各暴露試験場から回収した 9 試験土壌(Fig. 2 参照)の成分分析を行った。土壌の細粒分と蛍光 X 線分析結果の抜粋を Table 2 に、抽出液の pH、イオン濃度の結果を Table 3 に示す。

西原の 1 層目、2 層目共にナトリウムイオン、塩化物イオンが比較的高い値を示し、3.1 各深度の腐食減量測定結果では大気の影響は小さいと述べたが、土壌中に海塩粒子が堆積していることが分かった。このことから土壌腐食は、本報のような 1 年間の短期間の暴露試験結果には海塩粒子の影響がないと考えられる。しかし、より長期の暴露試験結果には海塩粒子の影響が反映される可能性がある。

また、葛城の 3 層目と伊賀の 3 層目は、抽出液の pH が非常に高かった。葛城の 3 層目については、暴露試験において金属色を示した層と深度がほぼ一致しており、この高 pH が鋼材表面を不働態化したと考えられる。また、この部分だけ電位が貴化したことで、カソードとなり、より防食されたと考えられる。

Table 2 Results of ratio of fine particle and chemical analysis of soil at each depth at Iga, Katsuragi and Nishihara test sites

Sample number	Ratio of fine particle [wt%]	Major element [wt%]									
		C	O	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	
Iga	①	28	3.3	54	0.6	9.9	24	0.07	0.04	2.0	1.5
	②	30	2.6	53	0.9	8.9	26	0.06	0.03	2.6	1.1
	③	10	2.1	50	1.0	7.5	26	0.05	0.27	2.2	5.2
Katsuragi	①	25	3.4	53	1.4	8.5	24	0.14	0.05	1.4	2.6
	②	12	2.0	53	1.1	7.4	25	0.07	0.02	1.7	4.4
	③	25	4.3	53	1.3	8.1	22	0.16	0.07	1.3	5.0
	④	20	3.1	53	1.3	8.7	24	0.16	0.06	1.3	2.3
Nishihara	①	84	4.2	52	1.2	9.0	22	0.07	0.06	2.2	3.0
	②	87	4.1	52	1.2	8.7	21	0.06	0.05	1.7	4.4

Table 3 Results of pH and ion of soil at each depth at Iga, Katsuragi and Nishihara test sites

Sample number	pH (°C)	Amounts of ion [mg/100g soil]								
		Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	F ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	K ⁺	NH ₄ ⁺	
Iga	① 5.26 (26.4)	0.2	0.89	0.92	<0.03	<0.03	18	0.58	0.05	
	② 7.00 (26.7)	0.14	1.9	0.32	0.04	<0.03	1.5	0.51	<0.03	
	③ 11.42 (26.5)	0.29	13	1	<0.03	0.04	0.1	1.2	<0.03	
Katsuragi	① 7.88 (26.1)	0.36	3.2	1.3	0.14	<0.03	25	0.22	<0.03	
	② 8.29 (26.1)	0.13	1.1	0.4	0.05	<0.03	4.4	0.13	<0.03	
	③ 11.80 (26.2)	2.3	3.4	0.16	0.21	<0.15	<0.15	<0.15	1.6	
	④ 7.77 (26.3)	0.67	16	0.67	0.14	<0.03	27	0.85	<0.03	
Nishihara	① 7.98 (26.2)	2.2	3.3	1.7	0.07	0.09	3.8	0.57	0.05	
	② 8.01 (26.2)	1.2	11	2.5	0.12	<0.03	0.26	0.15	<0.03	

この高 pH は、葛城の 3 層目ではアンモニウムイオン濃度が高く、伊賀の 3 層目ではカリウムイオン、硫酸イオンの濃度が高いことから、周辺環境から化学肥料の影響を大きく受けたものであると考えられる。また、カルシウム元素の割合も比較的高いことから、土地造成の際に重機などの走破性を確保する目的で、石灰を含む添加剤を入れ、地盤改良を行った可能性がある。このことから、土壌の pH については、人為的な影響が大きく、マクロセル形成に寄与する可能性があることが分かった。

3.3 土壌中交流インピーダンス測定結果

分析を行った土壌の腐食性評価を分極抵抗測定によって行った。本実験のナイキスト線図は、Fig. 4 に示した等価回路から一つの円弧が得られると考えられる。この円弧の X 軸との二つの交点において、低インピーダンス側を土壌抵抗(R_{soil})、高インピーダンス側を土壌抵抗と分極抵抗(R_p)を足し合わせた値であるとした。一例として葛城で回収した土壌を評価した結果をナイキスト線図で Fig. 7 に示す。Fig. 7 から四つ全ての土壌で円弧が一つ得られた。伊賀、西原の土壌についての結果でもそれぞれの土壌で一つの円弧が得られており、それぞれの分極抵抗を算出することができた。そこで暴露試験場ごとに分極抵抗と腐食減量の関係を Fig. 8、Fig. 9、Fig. 10 に示す。伊賀(Fig. 8)については、分極抵抗が小さい層ほど、腐食減量が大きくなる傾向を示した。pH が高い 3

Fig. 7 Nyquist diagrams of carbon steel (SPCC) in soils collected at Katsuragi

Fig. 8 Relationship between corrosion rate, depth from ground level and polarization resistance at Iga test site

Fig. 9 Relationship between corrosion rate, depth from ground level and polarization resistance at Katsuragi test site

Fig. 10 Relationship between corrosion rate, depth from ground level and polarization resistance at Nishihara test site

層目が最も分極抵抗が高く、腐食減量も小さかったが、分極抵抗の上昇幅は小さく、不動態膜が生成していると考えするには値が小さい。後述する葛城の3層目の分極抵抗と比較しても一桁程度、小さい値であるため、何らかの理由により、不動態膜が生成しづらいことが考えられるが詳細は不明である。

葛城(Fig. 9)については、伊賀と同様、分極抵抗と腐食減量にある程度の相関が見られた。Fig. 7からも分かるように3層目の分極抵抗が非常に大きく、不動態膜の生成によるものと考えられる。この層にある円筒形腐食片の腐食減量についても非常に小さい値となっており、分極抵抗の値と一致する。しかし、1層目と2層目の分極抵抗のほうが4層目の分極抵抗より大きいにもかかわらず、腐食減量は大きい値を示した。これは、1層目と2層目の部分をアノード、3層目をカソードとしてマクロセル腐食が発生したことで、1層目と2層目の腐食が促進されたためと考えられる。

西原(Fig. 10)については、1層目、2層目で土壌の外観に違いがなく、成分分析による結果にも大きな違いが見られなかったこともあり、分極抵抗は非常に大きい値を共に示し、大きな違いはなかった。しかし、深度が大きくなるほど、腐食減量が大きくなっており、伊賀と葛城で示したような分極抵抗と腐食減量に相関がなかった。これは、西原においてはTable 2の細粒分が非常に

大きい値であり、粘土質であったことから、土壌の通気性が低く、深度に対する酸素濃度の勾配が大きく、非常に浅い層間で酸素濃淡によるマクロセル腐食が発生したのと考えられる。しかし、土壌の化学組成変化による腐食量の増減と比較すると、酸素濃淡による腐食量の増減は小さかった。

4. 結 言

太陽光発電設備の基礎構造に見られる、浅層土壌中に金属表面が接し、地際部より金属が突出している環境の腐食要因を検討するため、深度毎の腐食減量測定と各暴露試験場の土壌の成分分析、土壌を電解質とする電気化学測定を行った。これにより以下の知見が得られた。

- (1) ミクロセル腐食、マクロセル腐食の両方を考慮した深度ごとの腐食減量測定を行い、浅層土壌中の腐食量は、土壌中の腐食量として一般的に示される年間0.02 mmの腐食量を上回った。
- (2) 各土壌の分極抵抗の測定結果と腐食減量を比較することで、各深度の腐食量は、各深度の土壌を電解質として測定された分極抵抗とほぼ相関があることが分かった。しかし、土壌層の相互作用によるマクロセル腐食など、土壌中では他の要因による腐食が発生することも多く、腐食量と分極抵抗で相関を示さない場合もある。
- (3) マクロセル腐食については、化学肥料や土地造成に用いられる添加剤によって、ある土壌層のみ大幅に環境が変化することで、その部分の金属表面の電位が変化し、発生するものと考えられる。土壌の低い通気性から起こる酸素濃度勾配によるマクロセル腐食については、土壌の化学組成の違いによる影響と比較して腐食量への寄与は小さいことが分かった。

今後は、腐食減量測定を測定した試験杭を改造し、深度ごとに電極を埋設することで、ガルバニック電流を測定し、マクロセル腐食の検討を実施していく。

謝辞

本研究成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務の結果得られたものの一部である。

参 考 文 献

- 1) Y.Sugimura, K.Noda, M.Toyoshima, K.Sakai, H.Ono, T.Umeno, G.Fukui, F.Chatani, Y.Kikuchi, H.Aoki, M.Tamura, N.Tomonaga, T.Hara, M.Kanda, H.Yokota, T.Mogami, A.Teshigawara, K.Bessho, S.Yamada, A.Yoshida, M.Tanaka, M.Asogawa, T.Shinohara, H.Yamashita, M.Nishiguchi, K.Miyamoto, T.Matsumoto, A.Kimura, A.Abe and A.Suwa, *Jibankougaku · jitsumu series 17 Kuikiso no chosa · sekkei · seko kara kensa made*, Japanese Geotechnical society, p.236 (2004).
- 2) M.Kobayashi, S.Kiya, R.Nemoto, K.Horioka, S.Kaneko and Y.Inoue, *Boshoku-Gijutsu*, (presently *Zairyo-to-Kankyo*) **38**, pp.327-332 (1989).
- 3) N.Emukai and H.Takazawa, *Zairyo-to-Kankyo*, **42**, pp.136-143 (1993).
- 4) K.Yamamoto, K.Kudou, K.Nishi, *Kaiyo Kaihatsu Ronbun shu*, **8**, pp.201-205 (1992).
- 5) F.Kajiyama, *Zairyo-to-Kankyo*, **46**, pp.491-497 (1997).
- 6) K.Matsuoka, M.Yamamoto and K.Goto, *Zairyo-to-Kankyo*, **56**, pp.99-105 (2007).

7) ANSI A21.5-1972 (AWWA C 105-72).

(Manuscript received December 15, 2017;
in final form February 13, 2018)

要 旨

再生可能エネルギー固定買取制度を背景に、太陽光発電設備は急増した。太陽光発電設備の基礎杭は、浅層土壌中に金属表面が接し、地際部より突出している。本研究では、この環境における腐食の把握を目的に、杭状試験体の暴露試験と暴露試験場土壌の分析を行った。浅層土壌中の腐食量は、土壌中の腐食量として一般的に示される年間 0.02 mm の腐食量を上回った。それらの腐食量は各土壌を電解質とした分極抵抗測定結果と良い相関を得た。地際部のマクロセル腐食は、土地造成など人為的な作用により土壌の化学組成が大きく変化することが一因であると考えられる。

キーワード 土壌腐食, マクロセル腐食, 地際部, 暴露試験, 不働態皮膜, 交流インピーダンス法