

# 交流インピーダンス法による構造物模擬試験体各部位の大気腐食モニタリング

片山 英樹\*・升田 博之\*・野田 和彦\*・山本 正弘\*<sup>2</sup>

Atmospheric Corrosion Monitoring in Each Part of Model Structure Using AC Impedance Method

Hideki KATAYAMA, Hiroyuki MASUDA, Kazuhiko NODA and Masahiro YAMAMOTO

**Synopsis :** AC impedance method has been applied to evaluate the corrosion resistance in each part of the steel model structure exposed to outdoor environment. The corrosion sensors, which were made of the same materials as the steel model structure, were installed to each part of the model structure. The impedances at 10 kHz and 10 mHz were continuously measured between the steel model structure and the corrosion sensors, and the corrosion rate was obtained by subtracting the impedance at 10 kHz from at 10 mHz.

The corrosion rate and the solution resistance in each part of the steel model structure were greatly influenced by the environmental factors. While rain and dew condensation were observed, the low solution resistance and the high corrosion rate were measured in all parts of the steel model structure, indicating that the corrosion progresses due to the wetness of the surface. From the corrosion loss in each part of the steel model structure, the horizontal parts showed larger corrosion loss than the perpendicular parts, and the tendency was stronger in flange part than in roof part. The change in impedance and the corrosion loss suggested that the corrosion behaviors in each part of the steel model structure are different.

**Key words :** atmospheric corrosion; steel; model structure; corrosion rate; monitoring; AC impedance.

## 1. 緒言

四面が海に囲まれている我が国では、主要な鋼構造物が海浜地域に集中しており、鉄鋼材料の腐食において、海から飛来する海塩粒子の影響が大きいことが知られている<sup>1)</sup>。そのため、鉄鋼材料の大気腐食に関して非常に多くの研究が報告<sup>2)</sup>されており、その多くは平板試験片を用いた大気暴露試験の結果をもとに調査されてきた。しかしながら、構造物の場合、すべての部位が大気暴露試験と同じ環境（南面30°や45°向き）になっておらず、構造物の部位によっては、平板試験片とは腐食の状況が大きく異なると考えられる。

山本ら<sup>3)</sup>は、橋梁の内桁環境を模擬するため、普通鋼について覆い付きの大気暴露試験をおこなった。飛来する海塩粒子量と腐食速度との関係を調べた結果、通常の暴露試験と覆い付きの暴露試験での腐食速度の差は、飛来海塩粒子量が増加するにしたがって大きくなることを示した。この結果について彼らは、覆い付きの暴露試験では、降雨によって試料表面に付着した飛来海塩が洗い流されないため、塩が蓄積し厳しい腐食環境になるためであると報告している。また、宇佐見ら<sup>4)</sup>は、海岸線近くに仮設され10年以上経過した無塗装耐候性鉄道トラス橋について、保護的

なさび層の生成状況と構造との関係を検討した。彼らは、日照降雨が当たる対空面および風通しの良い面では、海岸線近くでも保護的なさび層が形成されること、雨水の当たりにくい対地面では、保護的なさび層が形成されにくいことを示し、構造の違いによって腐食状況が異なることを指摘している。すなわち、構造物の場合、たとえ同じ材料であっても、形状や部位などの構造上の因子によって腐食環境が異なるため、平板試験片の暴露試験だけでは構造物としての腐食挙動を完全に把握することはできないといえる。

大気腐食は表面に形成される薄い水膜下で進行する現象であり、その腐食挙動は天候だけではなく、1日の中でも時々刻々と変化する。したがって、大気腐食挙動を正確に把握するためには、短い期間での変化を連続的に測定できるシステムが必要になる。著者ら<sup>5,6)</sup>は、同心円型の炭素鋼製2電極式センサー（以下、腐食センサー）を作製し、交流インピーダンス法により屋外環境下で炭素鋼の大気腐食モニタリングをおこなった。その結果、測定されたインピーダンスの変化が、環境因子の変化とよく対応することがわかった。さらに、インピーダンスのデータから計算した腐食量と実際の腐食量がよく一致することを示し、本測定システムが屋外環境下での大気腐食のモニタリングに有

平成16年1月27日受付 平成16年4月29日受理 (Received on Jan. 27, 2004; Accepted on Apr. 29, 2004)

\* 物質・材料研究機構材料研究所 (Materials Engineering Laboratory, National Institute for Materials Science, 1-2-1 Sengen Tsukuba 305-0047)

\*<sup>2</sup> 物質・材料研究機構材料研究所 (現: 新日本製鐵(株) 鉄鋼研究所) (Materials Engineering Laboratory, National Institute for Materials Science, now Nippon Steel Corp.)

用であることを報告した。

本研究では、上記腐食センサーを応用し、各部位にピン型の電極を埋め込んだH型構造物模擬試験体について、交流インピーダンス法により各部位の大気腐食モニタリングを行った。得られたインピーダンスのデータから屋外環境におけるH型構造物模擬試験体各部位の大気腐食挙動について検討した。

## 2. 実験方法

### 2.1 H型構造物模擬試験体

Fig. 1に、普通鋼 (SM490) 製のH型構造物模擬試験体 (以下、模擬試験体) の外観写真および埋め込んだピン型の電極部分を拡大した模式図を示す。ピン型電極は、模擬試験体と同じ普通鋼製で、模擬試験体の各部位に穴あけ加工した後、テフロン製のギャップ(100 $\mu$ m)を介して埋め込んだ。埋め込み部位は、天井部、側面部、フランジ部とし、天井部の対空面と対地面、南向き面、北向き面およびフランジ部の対空面と対地面について測定できるようにピン型電極をセットした。暴露試験は、2000年4月より約1年間、本構内内の暴露試験場 (茨城県つくば市) で日照降雨の影響がある環境下でおこなった。環境因子は、光進電気工業 (株) 製KANTAM型気象観測装置により、気温、相対湿度、雨量および結露を5分おきに連続的に測定した。

### 2.2 大気腐食のモニタリング測定

大気腐食のモニタリングは、交流インピーダンス法によりFig. 2に示す測定システムを用いて行った。測定装置および制御用コンピュータは、模擬構造物体からおよそ5m離れた空調設備のある測定室内に設置し、屋外環境の影響を受けないようにした。インピーダンスの測定にはマルチチャンネル (最大12chの測定が可能) の小型腐食計 (理研電子製; CT-5) を用い、インピーダンスは模擬試験体とピン型電極間で2電極法により連続的に測定した。2電極間の印加電圧は10 mV、測定周波数は10 kHzおよび10 mHzの2周波数とした。ここで、10 kHzでのインピーダンスは溶液抵抗( $R_s$ )、10 mHzでのインピーダンスは溶液抵抗( $R_s$ )と分極抵抗( $R_p$ )の和に相当し、両周波数でのインピーダンスの差から分極抵抗( $R_p$ )が求められる<sup>7)</sup>。なお、測定時のノイズの影響については、模擬回路を用いた1ヶ月以上の連続測定から、その影響はほとんどないことを確認している。

## 3. 結果および考察

### 3.1 大気暴露試験後の模擬試験体の外観変化

大気暴露試験した後の模擬試験体の外観写真をFig. 3に示す。模擬試験体は、暴露試験開始から点さび状に腐食しはじめおよそ1週間後では金属光沢が残存していたが、

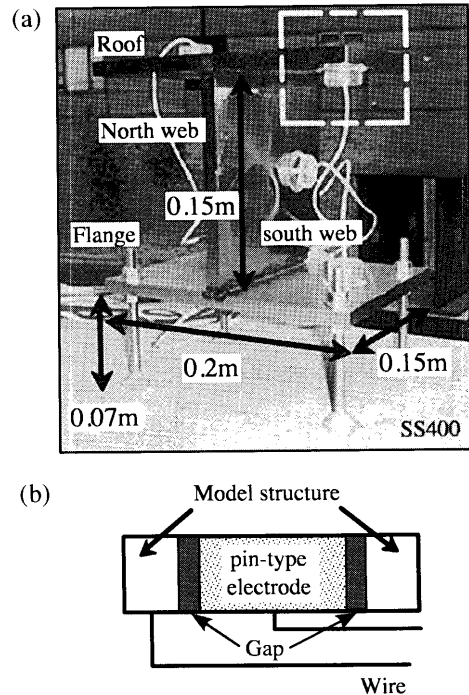


Fig. 1. Appearance of model structure (a) and schematic diagram of pin-type electrode (b). Gap size is about 100  $\mu$ m.

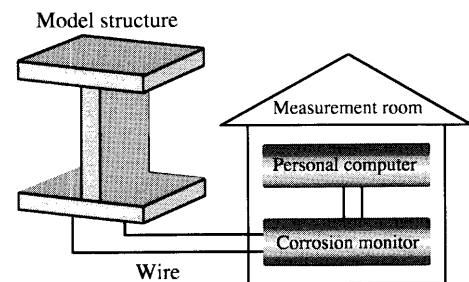


Fig. 2. Scheme of corrosion monitoring system for model structure.

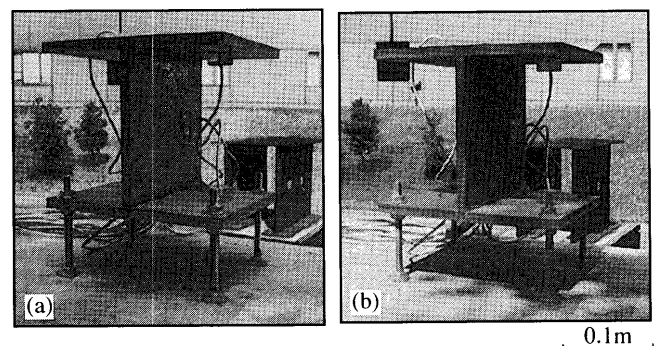


Fig. 3. Appearance of the model structure after exposure test for 1 week (a) and 2 months (b).

2ヶ月後には、すべての部位において全面がさびで覆われていた。ギャップの部分については、天井部の外観写真 (Fig. 3(b)) から、さび層が堆積していることがわかる。

### 3.2 環境因子の変化に対するインピーダンスの応答

Fig. 4に、測定開始から約1ヶ月後の降雨が観察された

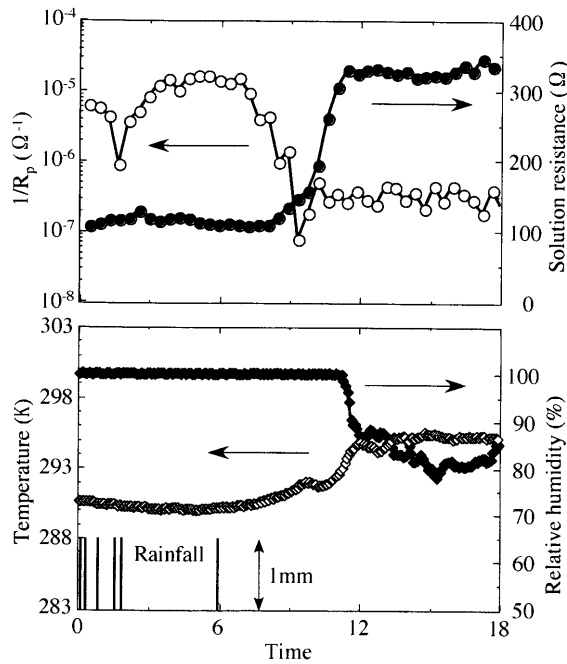


Fig. 4. Change in solution resistance ( $R_s$ ) and reciprocal of polarization resistance ( $1/R_p$ ) at upside of roof of the model structure (a), and change in relative humidity, rainfall and temperature (b) in a rainy day.

日 (0時から18時まで) における模擬試験体天井部の溶液抵抗( $R_s$ )と分極抵抗の逆数( $1/R_p$ )の変化を示す。図中、屋外の環境因子として、気温、相対湿度および雨量計による降雨量の変化もあわせて示した。ここで、 $1/R_p$ は腐食速度に比例する値であることが知られており<sup>8)</sup>、以下では $1/R_p$ を腐食速度と呼ぶことにする。1日における変化をみると、夜間、溶液抵抗は低く、腐食速度は高い値を示している。この日は前日から夜間にかけて降雨が観測されており、このインピーダンスの応答は、降雨の影響により表面が濡れ(低い溶液抵抗)、腐食が進行(高い腐食速度)したことを示している。一方、夜間から日中にかけて降雨の終了とともに天気が回復し、気温の上昇および相対湿度の低下がみられた。このとき、溶液抵抗は緩やかに上昇し電極表面が徐々に乾燥したことがわかる。さらに電極表面の乾燥が進むと、溶液抵抗は最大値を示し、腐食速度は非常に低い値を示す。これは、表面が乾燥する時間帯では、腐食がほとんど進行しないことを表している。

### 3.3 降雨時における模擬試験体各部位の腐食挙動

Fig. 5に、Fig. 4と同じ日における模擬試験体各部位の $1/R_p$ の変化(0時から18時まで)を示す。降雨が観測された時間帯では、すべての部位において、電極表面の濡れに対応し高い腐食速度が測定された。夜間における部位ごとの腐食速度を比較すると、地面に対して垂直な北向き面の腐食速度は、水平面である天井部対空面やフランジ部対空面より低い値を示していた。これは、雨の流れやすい構造である側面では、降雨の影響があっても表面が十分に濡れ

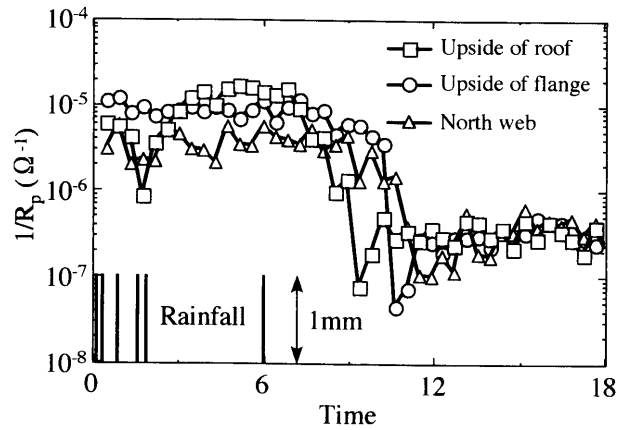


Fig. 5. Change in  $1/R_p$  in each part of the model structure. The environmental data is the same as data shown in Fig. 4.

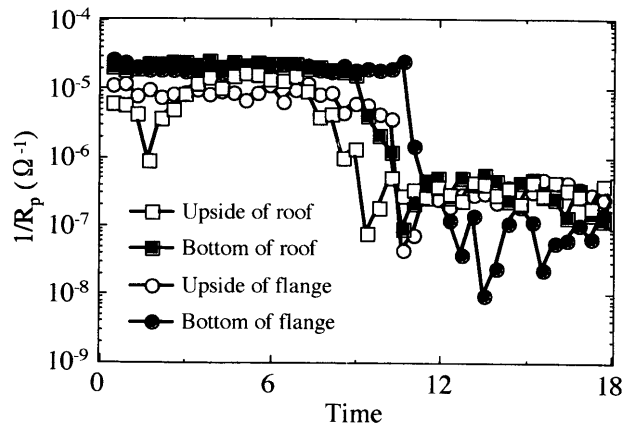


Fig. 6. Comparison of  $1/R_p$  at the upside and  $1/R_p$  at the bottom side of the model structure. The environmental data is the same as data shown in Fig. 4.

ないことに起因していると考えられる。一方、降雨時における天井部対空面とフランジ部対空面の腐食速度は、ほとんど同じ腐食速度を示していた。しかしながら、夜間から昼間にかけて表面が濡れている、すなわち腐食速度が高い時間をみると、フランジ部対空面の方が長くなっており、このことからフランジ部対空面の方が天井部より乾きにくく、腐食が進行する時間が長い部位であることがわかる。

Fig. 6に天井部およびフランジ部の対空面と対地面について、 $1/R_p$ の0時から18時までの変化を示す。環境データはFig. 4と同じである。降雨時における対地面の腐食速度は、対空面と比較して高い値を示し、また、腐食速度が高い時間も長くなっている。対地面の濡れにおよぼす降雨の影響について、雨の日に目視観察をおこなった結果、天井部、フランジ部ともに対地面は直接降雨の影響を受けているのではなく、降雨の影響を受ける対空面からさびを通過して濡れが生じているのが観察された。このことから、降雨時における対地面の濡れは、対空面ほど大きくは濡れていないと考えられ、対空面と対地面での腐食速度の違いは、対空面からさびを通過して表面に形成される水膜の厚さ

の影響が大きく起因していると考えられる。腐食速度におよぼす水膜厚さの影響についてはいくつかの研究報告があり、Tomashov<sup>9)</sup>は最大腐食速度を示す水膜厚さを約 $1\ \mu\text{m}$ と概念的に説明しており、Nishikataら<sup>10)</sup>は銅電極において $\text{pH}=3$ の酸性溶液中では数十 $\mu\text{m}$ の水膜厚さのとき腐食速度が最大になると報告している。また、著者ら<sup>11)</sup>は、同心円型の炭素鋼製2電極式センサーを用いて、交流インピーダンス法により屋外環境での炭素鋼の大気腐食モニタリングをおこなった。付着塩量と気温および相対湿度から表面に形成される平均の水膜厚さを熱力学的に計算し、腐食速度との関係を調査した結果、屋外環境においても数十 $\mu\text{m}$ 程度の水膜厚さの時に炭素鋼の腐食速度は最大になることを示した。すなわち、これらの結果から対地面では対空面と比較して腐食速度が高くなる水膜厚さ範囲の水膜が形成されていると考えられる。一方、腐食速度が高い時間、すなわち濡れている時間の違いについて、その原因は明らかではないが、天井部やフランジ部の対空面は、日照などの環境因子の影響を大きく受けると考えられ、これが表面の濡れ時間に影響をおよぼしていると考えられる。

### 3.4 結露時における模擬試験体各部位の腐食挙動

結露計により結露が観測された典型的な晴れの日（測定開始から約3週間後）における模擬試験体各部位の $1/R_p$ の変化をFig. 7に示す。結露が観測された時間帯では、全ての部位で高い腐食速度を示しており、表面が結露により濡れて腐食が進行していることが示唆される。とくに、結露時の天井部対空面の腐食速度は、他の部位と比較して最も高い値を示しており、その値は降雨時(Fig. 4)とほぼ同程度であった。すなわち、天井部対空面は結露で濡れが生じているときでもかなり腐食速度が大きいことがわかった。また、高い腐食速度を示している時間、すなわち結露により濡れが生じている時間についても、天井部対空面が最も長くなっていた。結露は、材料の温度が気温と相対湿度から決定される露点温度（相対湿度が100%になり表面に露を結ぶ温度）を下回るときに材料表面に生じる現象である。著者ら<sup>12)</sup>は、構造物模擬試験体各部位の板の温度について熱電対により連続測定し、気温と相対湿度から計算で求めた露点温度と比較した。その結果、天井部の温度変化は側面部と比較して大きく、また、露点温度を下回る頻度が多かったことを報告した。すなわち、天井部対空面は結露しやすく、また結露時は他の部位に比べて腐食環境が厳しくなると考えられる。

### 3.5 模擬試験体の各部位における腐食量

約1年間大気暴露試験した後の模擬試験体について、各部位での腐食量をFig. 8に示す。ここでの腐食量はアノード反応が2価の鉄の溶解反応であると考えて、インピーダンスのデータ $1/R_p$ を大気暴露した時間（約1年間）で積分することにより板厚減少量として計算で求めた。ただし、 $1/R_p$ の値は、腐食速度に比例する値であり、腐食速度に

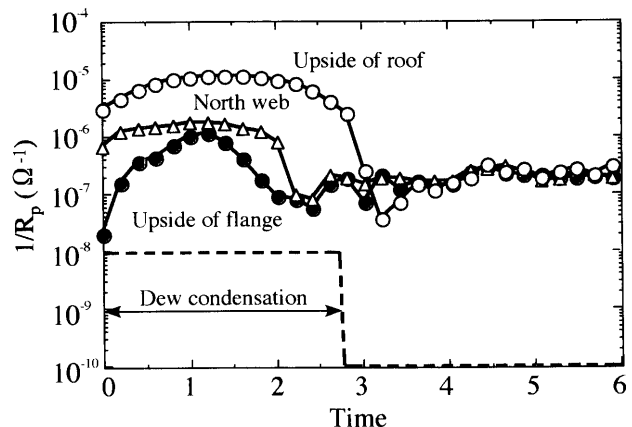


Fig. 7. Change in  $1/R_p$  in each part of the model structure during dew condensation.

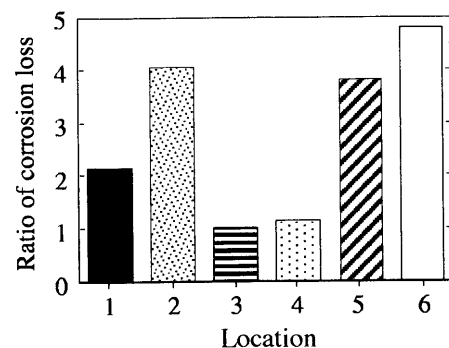


Fig. 8. Ratio of the corrosion loss in each part of the model structure after exposure test for about 1 year, where the ratio at the north web is a unity. 1; the upside of roof, 2; the bottom of roof, 3; the north web, 4; the south web, 5; the upside of flange and 6; the bottom of flange.

換算する際の比例定数が未知であることから、北向き部の板厚減少量を1として比で示した。各部位での腐食量を比較すると、垂直面である北向き面や南向き面の腐食量よりも水平面である天井部やフランジ部での腐食量の方が大きく、また、天井部よりフランジ部、対空面よりも対地面の腐食量の方が大きくなることがわかった。降雨時や結露時における各部位の腐食速度の変化から、結露のしやすさや乾きにくさなどが各部位の腐食量に大きく影響をおよぼしていると考えられる。

## 4. 結言

各部位にピン型電極を埋め込んだH型模擬試験体について、交流インピーダンス法によりピン型電極と試験体間で大気腐食速度のモニタリングをおこなった。その結果、以下のことがわかった。

(1) 構造物の場合、各部位によって濡れや結露などの腐食環境が異なるため、腐食挙動が大きく異なる。

(2) 腐食量は、フランジ部、天井部、側面部の順に大きく、また、天井部やフランジ部では、対空面の腐食量の

方が対地面より大きい。

(3) 模擬試験体にピン型電極を挿入し、ピン型電極と試験体間で2電極法により交流インピーダンス測定をおこなうことで、構造物の各部位における大気腐食挙動の違いをとらえることができる。

### 文 献

- 1) T.Kodama: *Zairyo-to-Kankyo*, **43** (2000), 3.
- 2) 例えば, H.Okada, Y.Hosoi, K.Yukawa and H.Naito: *Tetsu-to-Hagané*, **55** (1969), 355.
- 3) M.Yamamoto, S.Yamaguchi, H.Kihira, A.Usami, Y.Tanabe, K.Masuda, H.Inoue, S.Mizoguchi and T.Tsuzuki: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 1289.
- 4) A.Usami, Y.Tomita, T.Kusunoki, K.Tanabe and A.Ichikawa: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 1238.
- 5) H.Katayama, K.Noda, M.Yamamoto and T.Kodama: *J. Jpn. Inst. Met.*, **65** (2001), 298.
- 6) M.Yamamoto, H.Katayama and T.Kodama: *J. Jpn. Inst. Met.*, **65** (2001), 465.
- 7) A.Nishikata, S.Kumagai and T.Tsuru: *Zairyo-to-Kankyo*, **43** (1994), 82.
- 8) M.Stern and L.Geary: *J. Electrochem. Soc.*, **104** (1957), 56.
- 9) N.D.Tomashov: *Corrosion*, **20** (1964), 7.
- 10) A.Nishikata, Y.Ichihara and T.Tsuru: *Corros. Sci.*, **37** (1995), 897.
- 11) H.Katayama, M.Yamamoto and T.Kodama: Proc. of the 47th Japan Conf. on Materials and Environments, JSCE, Yamguchi, (2000), 31.
- 12) H.Katayama, A.Tahara, M.Yamamoto and T.Kodama: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 1113.