交流式電気鉄道に起因する土壤埋設パイプラインの 交流干渉とその対策*

細川 裕司**, 梶山 文夫**, 福岡 隆***

** 東京ガス株式会社 導管部

*** 株式会社ナカボテック 地中施設事業本部

AC Interference Arising from AC Powered Rail Transit Systems on Cathodically Protected Buried Steel Pipelines and its Measures*

Yuji Hosokawa**, Fumio Kajiya** and Takashi Fukuoka***

** Pipeline Dept., Tokyo Gas Co., Ltd.

*** Engineering Dept., Nakabohtec Corrosion Protecting Co., Ltd.

Field studies on the AC corrosion risk were conducted on a steel pipeline newly buried in proximity to an elevated AC powered rail transit system. The pipeline is coated with extruded polyethylene coatings and cathodically protected using two CP rectifiers. AC corrosion risk was assessed with respect to the cathodic protection criteria that have been developed by the authors based on AC and DC current densities measured using coupons. The average of AC current density of each coupon connected to the surveyed pipeline satisfied the criteria at all the test stations in the test section where distributed grounding system using distributed magnesium electrodes was installed for the mitigation of induced AC. However, AC current density reached at considerably high levels for short time periods during the passing of AC powered trains where the pipeline parallels the AC powered rail transit system. Then, the pipe was connected to a bare steel casing pipe through a solid-state DC decoupling device for AC mitigation. Consequently, AC current density decreased to a low level even while AC powered trains were passing and the risk of AC corrosion was completely removed.

Key words : cathodically protected pipeline, AC powered rail transit system, AC interference, induced AC, coupon, AC current density

1. 緒 言

近年、電力の高圧架空送電線や交流式電気鉄道とパイプラインが近接して建設されるケースが多くなっていることから、これらに起因する交流干渉によりパイプラインの交流腐食リスクが増大している。実際海外では、高圧架空送電線からの交流誘導の影響によるパイプラインの交流腐食事例^{1),2)}のほか、15 kV、16-2/3 Hz の交流電気方式で運行している交流式電気鉄道に近接して埋設されたパイプラインにおける交流腐食の事例が報告されている^{3),4)}。

我が国で交流腐食事例の報告はないが、これまで著者らは、送電電圧 66 kV、送電周波数 50 Hz の電力の高圧架空送電線に並行して埋設されたパイプラインにおいて、交流腐食に関するフィールド試験を実施している⁵⁾。その結果、プローブオフ電位 (IR を含まない真の管対地電位に相当する) が十分低く、例えば NACE の「分極電位を -0.85 V (飽和硫酸銅電極電位基準) よりもマイナス側の値とする」⁶⁾ といった従来のカソード防食管理基準を満足していても、プローブ交流電流密度が高い場合には交流腐食が発生し得ることを明らかにし

た。また、これらフィールド試験結果と室内試験の結果⁷⁾に基づいて、交流腐食リスクの有無を判断するための基準として、プローブ流入直流電流密度およびプローブ交流電流密度 (以下、合わせてプローブ電流密度と称する) を指標とするカソード防食管理基準 (以下、プローブ電流密度基準と称する) を提案した^{8),9)}。さらに、高圧架空送電線に並行して埋設されたパイプラインにおいて、プローブ電流密度基準に基づく交流腐食リスクの評価およびその対策について検討を行った^{8),10)}。

一方、これまで交流式電気鉄道に起因する土壤埋設パイプラインへの交流干渉については、現象の解明が十分になされておらず、また、その影響の評価方法や対策はまだ確立していない。今回は、交流式電気鉄道に近接して埋設された新設パイプラインにおいて交流腐食リスクが確認されたため、その現象を把握するためにフィールド試験を行い、さらに、プローブ電流密度基準に基づく交流腐食リスクの評価およびその対策に関する検討を実施したので報告する。

2. 交流式電気鉄道による交流干渉

2.1 交流式電気鉄道

電気鉄道は、変電所から架線で送出される電力を集電器で受電し、鉄道車両に積載された電動機により車輪を回転させて駆動する。架線で電力を送出する方式は電気方式と呼ばれ、電圧や周波数で分類される。我が国では、電気方式として、直流 600 V、750 V、1500 V ある

* 第 49 回材料と環境討論会 (姫路, 2002) で発表

** 〒105-8527 東京都港区海岸 1-5-20 (5-20, Kaigan, 1-Chome, Minato-ku, Tokyo, 105-8527 Japan)

*** 〒104-0033 東京都中央区新川 2-5-2 (5-2, Shinkawa, 2-Chome, Chuo-ku, Tokyo, 104-0033 Japan)

いは単相交流20kV、25kVが主に採用されている^{11)~13)}。単相交流方式の周波数としては、地域により50 Hz または 60 Hz が採用されている。直流電気方式により運転している電気鉄道を直流式電気鉄道、交流電気方式で運転している電気鉄道を交流式電気鉄道と呼ぶ¹⁴⁾。なお、本論文では一般的に使用されている表現として、前者を直流電鉄、後者を交流電鉄と称することとする。

2.2 交流電鉄による交流干渉

古くから、交流電鉄の架線を流れる交流電流に起因する誘導障害^{11)~13)}が知られており、パイプラインが近接して埋設された場合には、交流誘導によりパイプと大地間に交流電圧が発生する可能性がある。従って、万が一塗覆装欠陥が生じた場合には、塗覆装欠陥と大地の間で交流電流のやりとりがあることから、交流腐食リスクがあるといえる。また、直流電鉄のレール漏れ電流による電食と同様に、交流電鉄のレールから交流電流が漏れることによる交流腐食の可能性も考えられる^{15)~17)}。

以上、交流電鉄に近接して埋設されたパイプラインにおいては、交流誘導あるいは交流レール漏れ電流に起因する交流干渉による交流腐食リスクが懸念される。従って、こうしたパイプラインのカソード防食評価においては交流腐食リスクの評価が必要であると考えられる。交流腐食リスクは、管対地電位による評価が不可能であり、プローブ電流密度による評価が必須であることから^{8),9)}、今回のフィールド試験においてプローブ電流密度の計測を実施することとした。

3. 試験方法

3.1 新設パイプラインの概要

新設したパイプラインの概要を Fig. 1 に示す。当該パイプラインは、全長 30.3 km、口径 600 mm、グレード API 5 L X-65 のポリエチレン塗覆装鋼管であり、直流電鉄軌条横断部におけるレール漏れ電流対策として設置された2基の外部電源装置（以下、外電と称する）によりライン全体の電気防食が施されている。また、建設期間中における暫定的な電気防食および交流誘導低減のための分散接地^{8),10)}を目的として、約40箇所でMg電極をパイプに接続している。

試験は、Fig. 1 に示すように交流電鉄に近接するa地点～f地点の約8.0 kmの区間において行った。交流電鉄は、50 Hz、25 kV の交流電気方式で高架を走行しており、試験区間内の約4.5 kmの範囲でパイプラインと並行している。試験区間においては、パイプラインが鋼製鞘管内に敷設されている箇所が多く、この場合鞘管内にはパイプへの防食電流の流入経路を確保するために発泡モルタルを充填している。また、試験区間内におけるMg電極の接続箇所は23箇所である。

3.2 計測方法

使用したプローブはパイプと同様の鋼製のプローブであり、環境と接する面積を10 cm²に調整した。プローブ電流密度を計測するために、試験区間の44箇所の地点（以下、ターミナルボックスと称する）においてパイ

Fig. 1 Schematic of the pipeline surveyed and the location of an elevated AC powered rail transit system.

プ近傍にプローブを設置し、プローブおよびパイプからのリード線をターミナルボックスに立ち上げた。なお、パイプが鞘管内に敷設されている箇所については、鞘管内にプローブを設置した。44箇所のプローブのうち39箇所は鞘管内に、5箇所は土壤中に設置した。

各ターミナルボックスにおいて、プローブ電流密度計測器^{18),19)}を利用してパイプとプローブの間を流れる直流電流および交流電流を計測し、これをプローブの表面積(10 cm²)で除することにより、プローブ直流電流密度(I_{dc})およびプローブ交流電流密度(I_{ac})を計算した。プローブは、8.5秒間パイプと電氣的に接続した後、1.5秒間パイプから電氣的に切断する、という計10秒間のサイクルでオン/オフを繰り返し、パイプと電氣的に接続した8.5秒間にプローブを流れる電流を周波数10 kHzでサンプリングした。

サンプリングしたプローブ電流のデータから、プローブ直流電流密度をプローブ電流密度の平均値として、また、プローブ交流電流密度を50 Hz成分としてそれぞれ計算した。プローブ直流電流密度は、直流電流が環境側からプローブに流入している場合、すなわち防食方向に流れている場合を正とした。プローブ電流密度を15分間計測した結果をプローブ電流密度基準に照査して、各計測地点における交流腐食リスクの評価を行った。計測時間を15分間としたのは、この間に交流電鉄が平均して数本は通過するため、その影響を計測できると判断したものである。

4. 試験結果および考察

4.1 プローブ電流密度計測結果

外電2基により電気防食され、かつ、Mg電極を試験区間内の23箇所接続した状態において、プローブ電流密度を15分間計測した。この時のプローブ流入直流電流密度の平均値(I_{dc}^{Ave})およびプローブ交流電流密度の平均値(I_{ac}^{Ave})を、プローブ電流密度基準に照査した結果を Fig. 2 に示す。

プローブ電流密度基準は図中太線で示されており、著

Fig. 2 Evaluation of I_{AC}^{Ave} and I_{DC}^{Ave} with respect to the current density-based CP criteria.

者らはプローブ流入直流電流密度およびプローブ交流電流密度の計測結果が図中の太線枠内にあれば腐食速度が 0.01 mm/y 未満に抑制される、すなわち防食が達成される、ということを提案している^{8),9)}。枠外には懸念される主な腐食リスクを示しており、“AC corrosion”は交流腐食，“DC corrosion”は直流レール漏れ電流による電食や自然腐食，“Overprotection”は過防食が懸念されることをそれぞれ意味している。

交流腐食防止基準としては、プローブを利用した室内およびフィールド試験の結果⁷⁾に基づいて、プローブ交流電流密度の上限値を規定している。また、過防食防止基準としては、プローブオフ電位 (IR を含まない真の管対地電位) とプローブ流入直流電流密度の関係についてフィールド試験を実施した結果に基づいて、プローブオフ電位が -2 V (飽和硫酸銅電極電位基準) と塗覆装剥離が懸念されるレベル²⁰⁾まで低下することを防止するために、プローブ流入直流電流密度の上限値を 40 A/m^2 と規定している²¹⁾。ただし本規定については、過防食状況下における水素応力割れの防止という観点からも検討が必要であり、今後さらなる研究が必要であろう。電食・自然腐食防止基準としては、笠原の報告をもとにプローブ流入直流電流密度の下限値を 0.1 A/m^2 と規定している²²⁾。

Fig. 2 に示すように、いずれの地点においてもプローブ交流電流密度の平均値はプローブ電流密度基準を満足しており、交流腐食リスクの懸念はないものと判断された。これは、試験区間内において Mg 電極による分散接地を行ったことが交流レベルの低減に有効に機能したものと推測される。また、プローブ流入直流電流密度についても同様に基準を満足しており、電食や過防食のリスクもないと判断された。

Fig. 3 は、各計測地点におけるプローブ交流電流密度の 15 分間計測における平均値 (I_{AC}^{Ave}) および最大値 (I_{AC}^{Max}) を、a 地点からの距離に対してプロットしたものである。いくつかの地点で、プローブ交流電流密度の最大値は、プローブ交流電流密度の平均値の 2 倍以上という高い値を示した。特に、パイプラインが交流電鉄と並行している箇所 (d 地点～f 地点) においてプローブ交流電流密度の最大値は瞬時的に 100 Arms/m^2 という高い値を示し、e 地点で最も高い値を示した。プローブ交流電流密度の平均値と最大値が大きく異なっている

Fig. 3 Distribution of I_{AC}^{Ave} and I_{AC}^{Max} measured at test stations in the test section. The pipeline is paralleling an AC powered rail transit system from point “d” to point “f”.

ことから、交流電鉄並行部においてはプローブ交流電流密度のレベルが大きく変動していることが予想された。

4.2 プローブ電流原波形計測結果

プローブ交流電流密度のレベル変動を詳細に調査するために、e 地点においてプローブ電流の原波形を計測した。プローブ電流の原波形を 15 分間計測した結果を Fig. 4 (a) に、また、プローブ交流電流密度が最大値を示した時の原波形を拡大したものを Fig. 4 (b) に示す。

Fig. 4 (a) に示すように、計測時間中に交流電鉄が e 地点近傍を通過した時に、プローブ電流の振幅が大きくなった。すなわち、プローブ交流電流密度のレベルは交流電鉄の運行に伴い大きく変動し、交流電鉄通過時に高いレベルを示し、それ以外の時間帯においては比較的低いレベルであることが明らかになった。高圧架空送電線に起因する交流誘導の影響を受けたパイプラインにおいては、送電電流のレベルが大きく変化しない限りプローブ交流電流密度が大きく変動することはないと思われる。これに対し、今回のように、交流電鉄の通過に伴い短時間にプローブ交流電流密度が大きく変動するという現象は、交流電鉄に起因する交流干渉の大きな特徴であると言える。プローブ交流電流密度が最大を示した時のプローブ電流の原波形は、Fig. 4 (b) に示すように対称性の良い 50 Hz の正弦波であった。

4.3 プローブ交流電流密度長時間計測結果

交流電鉄に起因する交流干渉現象の発生要因を検討するために、プローブ交流電流密度の長時間計測を実施した。Fig. 5 に、e 地点において雨天時を含む 1 週間プローブ交流電流密度を計測した結果を示す。

日中は交流電鉄の運行に伴いプローブ交流電流密度が大きく変動し、交流電鉄の通過時に高い値を示した。これに対し、交流電鉄が運行されていない夜間においては、プローブ交流電流密度は安定して低いレベルを示した。

交流電鉄からの交流干渉の要因としては、2.2 に述べたように交流誘導と交流レール漏れ電流の 2 種類が考えられる。今回検討を行ったパイプラインにおいて、高いプローブ交流電流密度が計測された要因が交流レール漏

Fig. 4 Original waveform of the current flowing through a coupon at point "e".

- (a) Original waveform measured for 15 minutes during the passing of an AC powered train.
 (b) Original waveform when the AC current density was reached at the highest level.

Fig. 5 AC current density measured for 1 week including the time periods of rainy weather at point "e".

れ電流であるならば、雨天時にレール漏れ抵抗が低下して交流レール漏れ電流が増加し、これに伴い、プローブ交流電流密度も高くなることが推測される。しかし、Fig. 5 に示すように、晴天時と雨天時でプローブ交流電流密度のレベルに大きな差は見られなかった。従って、交流レール漏れ電流の影響が全くないとは言いきれないが、少なくとも架線で供給している交流電流による交流誘導が今回のパイプラインにおける高いプローブ交流電流密度レベルの大きな要因になっているものと推測される。ただし、今回の検討対象である交流電鉄はコンクリート製の高架を走行しているため、レール漏れ抵抗が比

Fig. 6 Comparison of I_{AC}^{Ave} and I_{AC}^{Max} before and after connecting a bare steel casing pipe with the carrier pipe through a solid-state DC decoupling device at point "e".

較的高いことが考えられる。従って、すべての交流電鉄について上記のことが当てはまるかどうかについては、さらなる検討が必要である。

4.4 直流ブロック装置による交流レベルの低減

e 地点において、プローブ交流電流密度の平均値はプローブ電流密度基準を満足していたものの、日中の交流電鉄の通過に伴いプローブ交流電流密度が最大で 150 Arms/m² 以上という高い値を示したことから、交流誘導対策を施すこととした。

交流誘導対策としては、パイプを低接地物と接続して交流電流を低接地物から大地に逃がすことが有効である²³⁾。著者らは、具体的な交流誘導対策として、交流誘導レベルや埋設環境に応じて、Mg 電極を直接接続するという低接地措置、直流ブロック装置 (Solid-state DC decoupling device)²⁴⁾、あるいはそれらを組み合わせた低接地措置を施すことを基本方針としている¹⁰⁾。今回の e 地点においては、プローブ交流電流密度の最大値のレベルが非常に高いこと、鋼製鞘管からのリード線がターミナルボックス内に立ち上がっていること、の 2 点から、パイプおよび鋼製鞘管からのリード線を直流ブロック装置を介して接続する、という低接地措置を施すことにより、プローブ交流電流密度レベルを低減することを試みた。直流ブロック装置を挿入する理由は、鋼製鞘管をパイプと接続して低接地状態にすることで e 地点における交流誘導レベルの低減を図ると同時に、直流電流である防食電流が鋼製鞘管に流入してプローブへの防食電流が不足することを防止するためである。

Fig. 6 に、直流ブロック装置を利用した低接地措置を施した後のプローブ交流電流密度の 15 分間平均値 (I_{AC}^{Ave}) および最大値 (I_{AC}^{Max}) を、低接地措置を施す前の値と比較して示す。プローブ交流電流密度の平均値は、直流ブロック装置を設置することにより 76.0 Arms/m² から 2.9 Arms/m² に大きく低減された。さらに、プローブ交流電流密度の最大値も、直流ブロック装置の設置後、258.8 Arms/m² から 6.8 Arms/m² に低減された。一方、プローブ流入直流電流密度の平均値は 12.2 A/m² から 12.0 A/m² とほとんど変化しておらず、流入する防食電流のレベルを変化させることなく、交流

Fig. 7 Original waveform of the current flowing through a coupon at point "e" after connecting a bare steel casing pipe with the carrier pipe through a solid-state DC decoupling device.

(a) Original waveform measured for 15 minutes during the passing of an AC powered train.
(b) Original waveform when AC current density was reached at the highest level.

誘導レベルの低減を図ることができた。

また、直流ブロック装置設置後の e 地点におけるプローブ電流の原波形を 15 分間計測した結果を Fig. 7 (a) に、また、プローブ交流電流密度が最大値を示した時の原波形を拡大したものを Fig. 7 (b) に示す。Fig. 7 (a) に示した通り、交流電鉄の通過時においてもプローブ電流の振幅は小さく、すなわちプローブ交流電流密度は低いレベルで推移していることが明らかとなった。また、プローブ交流電流密度が最大値を示した時の原波形は、Fig. 7 (b) に示すように、やや歪んでいいるものの依然として 50 Hz の正弦波であった。ただし、その振幅は小さく、またプローブ電流は常にプラスの値、すなわちプローブに電流が流入する方向になっていることから、非常に良好な防食状態にあると言える。

以上より、直流ブロック装置を利用して低接地措置を施すことにより、交流電鉄の通過時におけるプローブ交流電流密度の最大値で評価してもプローブ電流密度基準を十分に満足し、e 地点における交流腐食リスクは完全に除去された。

5. ま と め

交流電鉄に近接して新設されたパイプラインにおいて、プローブ電流密度計測による交流腐食リスクの評価とその対策に関する検討を実施した。その結果、以下の

ことが明らかになった。

- 交流電鉄の通過時にプローブ交流電流密度は増加し、交流腐食リスクがあることが明らかとなった。従って、交流電鉄に近接して埋設されたパイプラインのカソード防食評価においては、プローブ電流密度計測による交流腐食リスク評価が必要である。
- 今回見られた交流電鉄通過時のプローブ交流電流密度の増加は、交流電鉄からの交流誘導が主な原因と推定された。
- 交流誘導低減を目的として Mg 電極による分散接地を行った状態で計測したプローブ交流電流密度の平均値は、著者らの提案するプローブ電流密度を指標とするカソード防食管理基準を満足した。
- 直流ブロック装置を介してパイプを鋼製鞘管と接続するという低接地措置を施すことにより、交流電鉄通過時のプローブ交流電流密度は大きく低下した。

参 考 文 献

- 1) I. Ragault, Proc. NACE International Conference CORROSION/98, Paper No.557 (1998).
- 2) R. G. Wakelin, R. A. Gummow and S. M. Segall, Proc. NACE International Conference CORROSION/98, Paper No.565 (1998).
- 3) W. Printz, Proc. UK Corrosion '92, 1 (1992).
- 4) F. Stalder, "Pipeline Failures, Material Science Forum", 247, p.139 (1997).
- 5) F. Kajiyama and Y. Nakamura, *Corrosion*, 55 [2] 200 (1999).
- 6) "Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping.", NACE Standard RP 0169-1996.
- 7) Y. Nakamura and F. Kajiyama, *Bosei Kanri (Rust Prev. Control)*, 43 [9] 329 (1999).
- 8) Y. Hosokawa, F. Kajiyama and Y. Nakamura, Proc. NACE International Conference CORROSION/02, Paper No.02111 (2002).
- 9) Y. Hosokawa, F. Kajiyama and Y. Nakamura, *Zairyo-to-Kankyo*, 51 [5] 221 (2002).
- 10) Y. Hosokawa, F. Kajiyama, T. Fukaya and J. Kikuchi, *Zairyo-to-Kankyo*, 51 [6] 269 (2002).
- 11) 電気学会, 電食防止研究委員会編, 「新版 電食・土壌腐食ハンドブック」, コロナ社 (1986).
- 12) 電気学会編, 「新版 電気工学ハンドブック」, 電気学会 (1988).
- 13) 電気学会, 電気鉄道における教育調査専門委員会編, 「最新 電気鉄道工学」, コロナ社 (2000).
- 14) 資源エネルギー庁編, 「解説 電気設備の技術基準」, 文一総合出版 (1992).
- 15) Y. Torigoe, *Boshoku-Gijutsu (presently Zairyo-to-Kankyo)*, 6 [5] 249 (1957).
- 16) E. Fukutani, *Boshoku-Gijutsu (presently Zairyo-to-Kankyo)*, 27 [3] 131 (1978).
- 17) Y. Torigoe, *Boshoku-Gijutsu (presently Zairyo-to-Kankyo)*, 33 [11] 667 (1984).
- 18) F. Kajiyama, Y. Nakamura and Y. Hosokawa, *Zairyo-to-Kankyo*, 51 [1] 35 (2002).
- 19) Y. Hosokawa, F. Kajiyama and Y. Nakamura, Proc. NACE International Conference CORROSION/02, Paper No.02112 (2002).
- 20) BS 7361 Part 1 Section 4 (1991).
- 21) Y. Hosokawa, F. Kajiyama and Y. Nakamura, *Corrosion* (to be published).
- 22) K. Kasahara, *Boshoku-Gijutsu (presently Zairyo-to-Kankyo)*, 30 [8] 524 (1981).
- 23) 例えば, "Mitigation of Alternating Current and Lightning Effects on Metallic Structures and Corrosion Control Systems.", NACE Standard RP 0177-2000.
- 24) H. Tachick, *Materials Performance*, 40 [2] 20 (2001).

(Manuscript received October 25, 2002; in final form January 8, 2003)