

2025 年度 第 2 回常任幹事会 議題

・役員等交代について

(1) 前回常任幹事会議事録確認 (書面決議)

(2) 各社 2025 年度電気防食設備設置状況

- ・東日本旅客鉄道 ~~—(資料 No. 2025-18)—~~ 完了のため提出なし、資料No.2025-18 欠番とする
- ・名古屋市交通局 (資料 No. 2025-19)
- ・名古屋鉄道 (資料 No. 2025-20)
- ・愛知県企業庁 (資料 No. 2025-21)
- ・三重県企業庁 (資料 No. 2025-22)
- ・名古屋市上下水道局 (資料 No. 2025-23)
- ・東邦ガスネットワーク (資料 No. 2025-24)
- ・サーラエナジー (資料 No. 2025-25)
- ・金沢エナジー (資料 No. 2025-26)

(3) 第 14 回実務者向け電食防止勉強会開催報告 (資料 No. 2025-27)

(4) 第 60 回電食防止講習会について (資料なし)
2025 年 10 月 24 日開催予定

(5) 第 66 回中部・関西電食防止合同研究発表会 (資料 No. 2025-28)
2025 年 11 月 17 日開催予定

(6) 研修会行先に関するアンケートの実施 (案) (資料 No. 2025-29)

(7) 第 156 回 電食防止研究委員会報告 (資料 No. 2025-30)
第 157 回 電食防止研究委員会報告 (資料 No. 2025-31)

<次回 (2025 年度第 3 回常任幹事会) 開催予定>

- ・日時: 2026 年 2 月中旬 (別途、詳細は 1 月初旬にご連絡致します。)
- ・議題: 電気防食設備設置状況、
第 60 回電食防止講習会開催報告
第 66 回中部・関西電食防止合同研究発表会開催報告
第 53 回電食防止に関する研修会 (案)、
電鉄および埋設事業者の 2026 年度電気防食設備設置計画アンケート
電食防止研究委員会報告、他

以 上

中部電食防止委員会 2025 年度 第 1 回常任幹事会 議事録

1. 日時

2025 年 7 月 7 日（月）16：00～16：45

2. 場所

Web 会議システム（Zoom）と対面（東邦ガス会議室）の併用

3. 出席者（順序不同）

中部大学	：高橋会長	出席（対面）
名古屋工業大学	：川崎副会長	欠席
中部大学	：櫻井副会長	出席（対面、座長）
名古屋工業大学	：安井常任幹事	出席
中部大学	：山本常任幹事	出席
東海旅客鉄道(株)	：岡庭常任幹事	欠席
東日本旅客鉄道(株)	：降駒常任幹事	出席
西日本旅客鉄道(株)	：久保常任幹事	出席
名古屋市交通局	：安藤常任幹事	出席
名古屋鉄道(株)	：松本常任幹事	出席
近畿日本鉄道(株)	：伊藤常任幹事	出席
西日本電信電話(株)	：鈴木常任幹事	出席（対面）
東日本電信電話(株)	：牛越常任幹事	欠席
愛知県企業庁	：田中常任幹事	出席
名古屋市上下水道局	：松井常任幹事	出席
中部電力パワーグリッド(株)	：上野常任幹事	出席
東邦ガスネットワーク(株)	：伊藤常任幹事	欠席
中部大学	：橋本委員	欠席
名古屋工業大学	：青木委員	出席（対面）
事務局(東邦ガスネットワーク(株))	：安達事務局長、前田書記、野澤書記、近藤書記（記）	（対面）

☆Zoom での参加者を出席と記載。

4. 配布資料

- | | |
|--|------------------|
| (1) 東日本旅客鉄道(株)2025 年度電気防食設備設置状況 | (資料 No. 2025-1) |
| (2) 名古屋市交通局 2025 年度電気防食設備設置状況 | (資料 No. 2025-2) |
| (3) 名古屋鉄道(株)2025 年度電気防食設備設置状況 | (資料 No. 2025-3) |
| (4) 愛知県企業庁 2025 年度電気防食設備設置状況 | (資料 No. 2025-4) |
| (5) 三重県企業庁 2025 年度電気防食設備設置状況 | (資料 No. 2025-5) |
| (6) 名古屋市上下水道局 2025 年度電気防食設備設置状況 | (資料 No. 2025-6) |
| (7) 東邦ガスネットワーク(株)2025 年度電気防食設備設置状況 | (資料 No. 2025-7) |
| (8) サーラエナジー2025 年度電気防食設備設置状況 | (資料 No. 2025-8) |
| (9) (株) I N P E X パイプライン 2025 年度電気防食設備設置状況 | (資料 No. 2025-9) |
| (10) 金沢エナジー(株)2025 年度電気防食設備設置状況 | (資料 No. 2025-10) |
| (11) 第 76 回 総会（決議報告） | (資料No.2025-11) |
| (12) 第 14 回 実務者向け電食防止勉強会の開催について（ご案内） | (資料No.2025-12) |
| (13) 第 60 回 電食防止講習会の開催について | (資料No.2025-13) |
| (14) 第 66 回 中部・関西電食防止合同研究発表会（案）について | (資料No.2025-14) |
| (15) 2025 年度年間スケジュール（案） | (資料No.2025-15) |

(16) 第 155 回 電食防止研究委員会議事録

(資料No.2025-16)

(17) 総会欠席の事業者への冊子資料の郵送廃止について

(資料No.2025-17)

5. 議事

※役員等交代について

人事異動に伴い、下記の通り役員等の交代があり、報告した。

東海旅客鉄道(株) 常任幹事：加藤様→岡庭様 (7月1日付)

(1) 前回常任幹事会議事録確認 (書面決議)

前回議事録(案)として事前にメール済みであり、修正事項等なく、承認された。

(2) 各社 2025 年度電気防食設備設置状況

・東日本旅客鉄道 2025 年度電気防食設備設置状況 (資料 No. 2025-1)

東日本旅客鉄道様より 1 件の撤去案件の報告があった。

・名古屋市交通局 2025 年度電気防食設備設置状況 (資料 No. 2025-2)

愛知県企業庁様より 1 件の計画変更について報告があった。

・名古屋鉄道 2025 年度電気防食設備設置状況 (資料 No. 2025-3)

名古屋鉄道様より 2 件の計画変更について報告があった。(事務局にて代読)

・愛知県企業庁 2025 年度電気防食設備設置状況 (資料 No. 2025-4)

愛知県企業庁様より管理番号 4～10、18～22 の計画について報告があった。

・三重県企業庁 2025 年度電気防食設備設置状況 (資料 No. 2025-5)

三重県企業庁様より 1 件の計画について報告があった。(事務局にて代読)

・名古屋市上下水道局 2025 年度電気防食設備設置状況 (資料 No. 2025-6)

名古屋市上下水道様より 3 件の計画について施工会社が決定したことについて報告があった。

・東邦ガスネットワーク 2025 年度電気防食設備設置状況 (資料 No. 2025-7)

東邦ガスネットワーク様より 1 件の計画変更と 2 件の仮設外電の設置について報告があった。(事務局にて代読)

・サーラエナジー 2025 年度電気防食設備設置状況 (資料 No. 2025-8)

サーラエナジー様より 1 件の計画について報告があった。(事務局にて代読)

・I N P E X パイプライン 2025 年度電気防食設備設置状況 (資料 No. 2025-9)

I N P E X パイプライン様より 1 件の計画について報告があった。(事務局にて代読)

・金沢エナジー 2025 年度電気防食設備設置状況 (資料 No. 2024-10)

金沢エナジー様より 1 件の計画について報告があった。(事務局にて代読)

(3) 第 76 回総会決議報告 (資料No.2025-11)

事務局より第 76 回総会における決議結果・会計報告、他地区総会の出席について報告した。

(4) 第 14 回実務者向け電食防止勉強会 (案) (資料 No. 2025-12)

事務局より第 14 回実務者向け電食防止勉強会 (案) について、今年度は「A. 初心者編(基礎知識の習得、各種計測の体験学習)」の実施を計画していることをご説明し、審議の結果、ご承認をいただいた。

(5) 第 60 回電食防止講習会 (案) (資料 No. 2025-13)

事務局より第 60 回電食防止講習会 (案) について、2024 年度に改訂したテキストを使用すること、長野開催予定であること、昨年度までの受講者アンケート結果を基に講習スケジュールを変更することをご説明し、審議の結果、ご承認をいただいた。

(6) 第 66 回 中部・関西電食防止合同研究発表会 (案) (資料 No. 2025-14)

事務局より第 66 回 中部・関西電食防止合同研究発表会 (案) について、今年度は関西での開催となること、講演については現時点で詳細は未定であるが、前回実績から中部電食防止委員会からは 2 テーマの発表となる見込みで、発表者は中部大学の先生と日本防蝕工業(株)様にご依頼する予定であることをご説明し、ご承認をいただいた。なお、正式な講演依頼は関西電食防止委員会様より発表会の内容について受領次第行うことをご説明した。

(7) 2025 年度年間スケジュール (案) (資料 No. 2025-15)

事務局より 2025 年度年間スケジュール (案) についてご説明した。

(8) 第 155 回 電食防止研究委員会報告 (資料 No. 2025-16)

事務局より、第 155 回の電食防止研究委員会の開催状況及び議事録の内容について報告を実施した。

(9) 総会欠席の事業者への冊子資料の郵送廃止について (資料 No. 2025-17)

事務局より、電子化への取り組みや中部電食防止委員会ホームページにおける総会資料の公開を踏まえ、総会欠席事業者様への冊子資料の郵送の廃止・希望者のみ郵送への変更案を提案し、審議の結果、ご承認をいただいた。

<次回 (2025 年度第 2 回常任幹事会) 開催予定>

- ・ 日時 : 2025 年 10 月 22 日 (水) 16 : 00 ~
- ・ 形式 : リモート + 対面のハイブリッド (対面は東邦ガス会議室)
- ・ 議題 : 電気防食設備設置状況、第 14 回実務者向け電食防止勉強会開催報告、
第 66 回中部・関西電食防止合同研究発表会 (発表会講演者等)、
研修会行先に関するアンケートの実施、
電食防止研究委員会報告、他

以 上

2025 年 10 月 22 日

名古屋市交通局 2025 年度 電気防食設備設置状況

1. 電気防食装置設置状況一覧

番号	防食路線(施設)名	防食設備内容	設置場所	関係事業者	着手予定年月	完了予定年月	通知事項	記 事
1	前津変電所設備更新		名古屋市中区富士見町7番22号		令和4年8月	令和8年2月		(整流器) 1,500kW×3台、4,000kW×2台 ↓ 1,500kW×2台、4,000kW×2台
2								
3								

2. 連絡先

企業名 名古屋市交通局
部署名 技術本部車両電気部電気課
担当者名 安藤 善文
TEL 052-972-3894
FAX 052-972-3936

2025 年 10 月 22 日

(名古屋鉄道株式会社) 2025 年度 電気防食設備設置状況

1. 電気防食装置設置状況一覧

番号	防食路線(施設)名	防食設備内容	設置場所	関係事業者	着手予定年月	完了予定年月	通知事項	記 事
1	ナゴヤ球場前変電所	変成機	名古屋市中川区山王 3 丁目 1 6-2 8	—	2025. 4	2026. 2		容量変更 6000KW⇒7000KW
2	黒笹変電所	変成機	みよし市黒笹いずみ 1 丁目	—	2025. 4	2026. 3		容量変更 6000KW⇒4000KW
3								

2. 連絡先

企業名 名古屋鉄道株式会社
部署名 電気部 電気課
担当者名 松本 翔（まつもと しょう）
T E L 052-825-3119
F A X 052-825-3120

愛知県企業庁 2025年度 電気防食設備設置状況

1 電気防食装置設置状況一覧

番号	防食路線(施設)名	防食設備内容	設置場所	関係事業者	着手予定年月	完了予定年月	通知事項	記事
1	緑幹線と合外電	外部電源装置 60V-20A 1台	愛知郡東郷町和合新濁池地内	なし	令和7年2月	令和8年3月	更新	
2	緑幹線白土外電	外部電源装置 60V-30A 1台	名古屋市緑区鳴海町字白土地内	東邦ガス(株)	令和7年2月	令和8年3月	更新	東邦ガス(株)との干渉調査予定
3	緑幹線阿原外電	外部電源装置 60V-15A 1台	名古屋市南区阿原町地内	なし	令和7年2月	令和8年3月	更新	
4	第2犬山幹線 小牧古雅整流器	外部電源装置 60V-10A 1基	小牧市古雅地内	小牧市水道	令和7年1月	令和8年1月	新設	小牧市水道との干渉調査予定
5	一宮竹橋整流器	外部電源装置 60V-10A 1基	一宮市竹橋町地内		令和7年11月	令和8年3月	更新	
6	一宮中島整流器	外部電源装置 60V-10A 1基	一宮市萩原町東宮重地内		令和7年11月	令和8年3月	更新	
7	幸田幹線安城小川排流器	シリコン排流器 150A 1基	安城市小川町地内	名古屋鉄道(株)	令和7年9月	令和9年2月	更新	
8	豊田幹線豊田鴻ノ巣排流器	シリコン排流器 150A 1基	豊田市鴻ノ巣町地内	名古屋鉄道(株)	令和7年9月	令和9年2月	更新	
9	第1刈谷線刈谷幸排流器	シリコン排流器 150A 1基	刈谷市幸町地内	名古屋鉄道(株)	令和7年9月	令和9年2月	更新	
10	第1衣浦幹線碧南天王排流器	シリコン排流器 150A 1基	碧南市天王町地内	名古屋鉄道(株)	令和7年9月	令和9年2月	更新	
11	豊川権現線平尾外電	直流電源装置 屋外自立型 60V-10A 1台	豊川市平尾町地内		令和6年11月	令和8年2月	更新	
12	豊川権現線樽井外電	直流電源装置 屋外柱上型 60V-5A 1台	豊川市長草町地内		令和6年11月	令和8年2月	更新	
13	豊川権現線谷川外電	直流電源装置 屋外自立型 60V-10A 1台	豊川市東名町地内		令和6年11月	令和8年2月	更新	
14	第2新城線下条東外電	直流電源装置 屋外柱上型 60V-20A 1台	豊橋市下条東町地内		令和6年11月	令和8年2月	更新	
15	豊橋臨海幹線老津外電	直流電源装置 屋外柱上型 60V-15A 1台	豊橋市老津町		令和6年10月	令和8年2月	更新	
16	豊橋臨海幹線明海東外電	直流電源装置 屋外柱上型 60V-20A 1台	豊橋市明海町		令和6年10月	令和8年2月	更新	設置場所移設、更新前:屋外自立型、更新後:屋外柱上型
17	豊橋臨海幹線明海西外電	直流電源装置 屋外柱上型 60V-20A 1台	豊橋市明海町		令和6年10月	令和8年2月	更新	更新前:屋外自立型、更新後:屋外柱上型
18	豊橋城下線東小鷹野外電	直流電源装置 屋外自立型 60V-5A 1台	豊橋市東小鷹野2丁目地内	サーラエナジー(ガス)	令和7年9月	令和9年2月	新設	サーラエナジー(ガス)との干渉調査予定
19	豊橋城下線多米外電	直流電源装置 屋外自立型 60V-10A,5A(2回路) 1台	豊橋市多米町地内	豊橋市水	令和7年9月	令和9年2月	新設	豊橋市水との干渉調査予定
20	豊橋城下線飯村外電	直流電源装置 屋外柱上型 60V-10A 1台	豊橋市飯村町地内		令和7年9月	令和9年2月	新設	
21	豊橋城下線豊栄外電	直流電源装置 屋内自立型 60V-15A 1台	豊橋市豊栄町地内		令和7年9月	令和9年2月	新設	
22	豊橋城下線富士見台外電	直流電源装置 屋内自立型 60V-5A 1台	豊橋市富士見台5丁目地内	豊橋市水	令和7年9月	令和9年2月	新設	豊橋市水との干渉調査予定

下線部は時点修正か所を示す。

2 連絡先

番号	担当者	連絡先
1～3	愛知用水水道事務所 配水課 配水G 石田技師	電話(0562)33-2282 FAX(0562)33-2285
4～6	尾張水道事務所 配水課 杉浦主査	電話(0586)-45-1170 FAX(0586)45-8490
7～10	西三河水道事務所 配水課 送水G 鬼頭技師	電話(0566)98-5652 FAX(0566)98-5653
11～14	東三河水道事務所 配水課 大橋技師	電話(0532)61-2839 FAX(0532)61-5431
15～17	東三河水道事務所 配水課 浅岡主査	電話(0532)61-2839 FAX(0532)61-5431
18～22	東三河水道事務所 建設課 越賀技師	電話(0532)61-2848 FAX(0532)61-5431

(三重県企業庁) 2025 年度 電気防食設備設置状況

1. 電気防食装置設置状況一覧

番号	防食路線(施設)名	防食設備内容	設置場所	関係事業者	着手予定年月	完了予定年月	通知事項	記 事
1	三期・伊坂外電	外部電源方式	四日市市伊坂町 地内	なし	2025. 9	2026. 3	なし	
2	三期・馳出外電	外部電源方式	四日市市馳出地内	なし	2025. 9	2025. 12	なし	令和 7 年 8 月 7 日追加
3								

2. 連絡先

企業名 三重県企業庁
部署名 技術管理・機電施設課
担当者名 岡本幸樹
T E L 059-224-2656
F A X 059-224-3043

2025 年 10 月 22 日

(名古屋市上下水道局) 2025 年度 電気防食設備設置状況

1. 電気防食装置設置状況一覧

番号	防食路線(施設)名	防食設備内容	設置場所	関係事業者	着手予定年月	完了予定年月	通知事項	記 事
1	朝日系導水路	外部電源装置 (60V×5A)	稲沢市祖父江町字大 藪付近	対象有	2025 年 3 月	2026 年 3 月	新規	株式会社ナカボーテック
2	朝日系導水路	外部電源装置 (60V×10A)	一宮市玉野字上葭野 付近	対象有	2025 年 3 月	2026 年 3 月	新規	株式会社ナカボーテック
3	朝日系導水路	外部電源装置 (60V×5A)	稲沢市西島一丁目付 近	対象有	2025 年 3 月	2026 年 3 月	新規	株式会社ナカボーテック

2. 連絡先

企業名 名古屋市上下水道局
部署名 技術本部管路部配水課
担当者名 奥平 圭祐
T E L 052-972-3685
F A X 052-972-3679

2025 年 9 月 25 日

(東邦ガスネットワーク株式会社) 2025 年度 電気防食設備設置状況 (計画)

1. 電気防食装置設置状況一覧

番号	防食路線(施設)名	防食設備内容	設置場所	関係事業者	着手予定年月	完了予定年月	通知事項	記 事
1	一宮～尾西線	一宮第3 外電 (新設)	愛知県一宮市萩原 地内	愛知県企業庁	2025 年 6 月	2025 年 <u>10 月</u>	調査中	添付資料 (1) 参照
2	一宮～尾西線	尾西三条 外電 (新設)	愛知県一宮市三条 知内	愛知県企業庁	2025 年 6 月	2025 年 <u>10 月</u>	調査中	添付資料 (1) 参照
3	南部幹線Ⅱ期	安城小川外電 (新設)	愛知県安城市小川町南 門原 5 番	愛知県企業庁	2024 年 4 月	2026 年 7 月		添付資料(2)参照
4	南部幹線Ⅱ期	半田緑ヶ丘 外電No.2 (新設)	愛知県安城市小川町南 門原 5 番	愛知県企業庁	設置済み (表中 1 の竣工 に合わせて稼働する計画)			添付資料(2)参照
5	鵜沼線	鵜沼外電 (増強)	岐阜県各務原市 真名越町 3 丁目付近	なし	2025 年度	2025 年度		添付資料 (3) 参照
6	今村～豊田線	(仮称) 新梅坪外電 (新設)	愛知県豊田市梅坪町付 近	名古屋鉄道 愛知環状鉄道	2025 年度	2025 年度		調整中
7	猪子石～桃花台線	猪高外電 No.3 回路 (仮設)	名古屋市名東区 藤里町地内	下記の連絡先まで ご連絡下さい。	2025 年 6 月	2026 年 6 月	臨時 仮設	添付資料(4)参照
8	猪子石～桃花台線	桃花台外電 No.2 回路 (仮設)	愛知県春日井市 桃山町 3 丁目知内		2025 年 6 月	2026 年 6 月	臨時 仮設	添付資料(4)参照

2. 連絡先

企業名：東邦ガスネットワーク株式会社
部署名：導管部 幹線センター 導管管理課
担当者名：鈴木 孝夫
T E L : 052-872-9692
F A X : 052-872-9497

追記：番号 7、8 については、防食状態
が安定しているため、稼働を見
送るもの。

以 上

一宮第 3 外部電源装置 (一宮～尾西線)

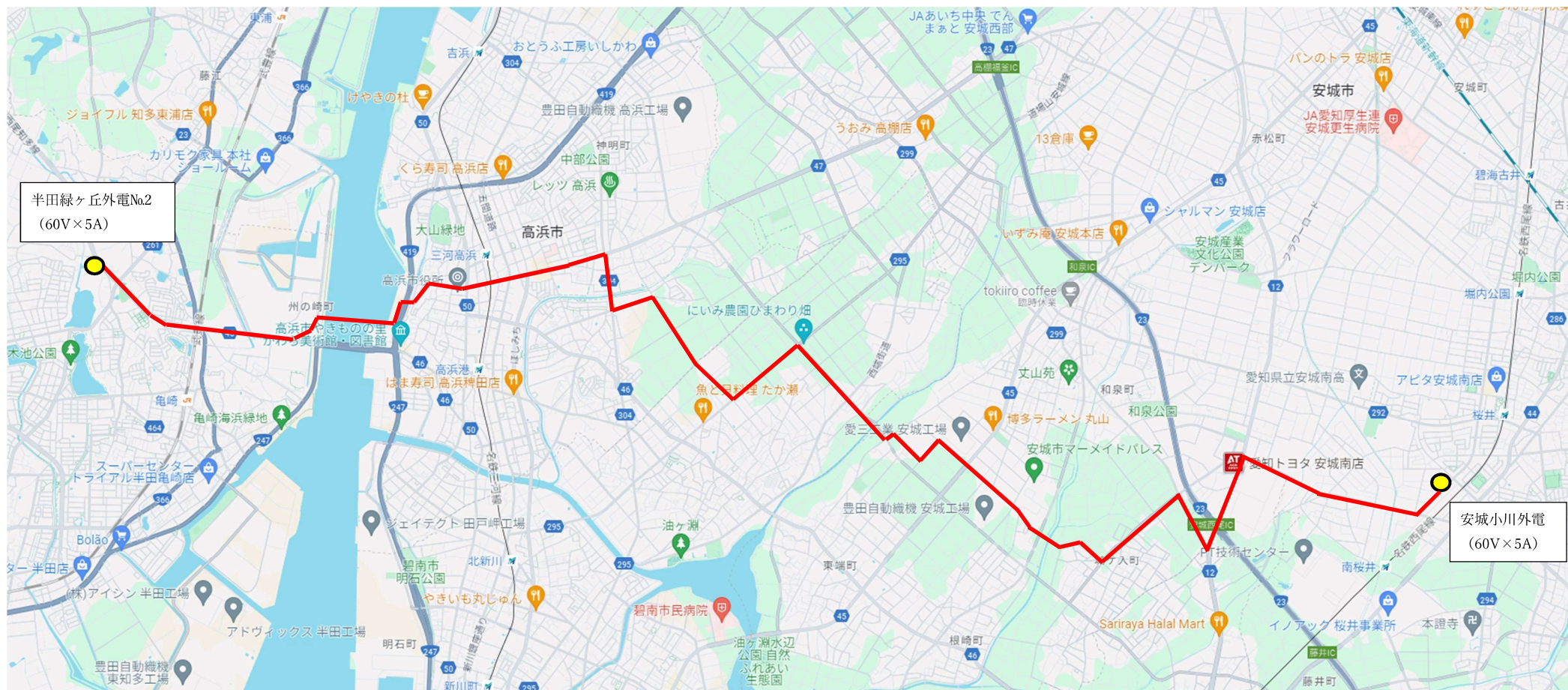
尾西三条外部電源装置 (一宮～尾西線)



国土地理院地図を使用

安城小川外電防食効果範囲(南部幹線Ⅱ期)

半田緑ヶ丘外電No.2 防食効果範囲(南部幹線Ⅱ期)



鵜沼外部電源装置(鵜沼線)



国土地理院地図を使用

猪高外部電源装置 (猪子石～桃花台線)
桃花台外部電源装置 (猪子石～桃花台線)



(サーラエナジー株式会社) 2025 年度 電気防食設備設置状況

1. 電気防食装置設置状況一覧

番号	防食路線(施設)名	防食設備内容	設置場所	関係事業者	着手予定年月	完了予定年月	通知事項	記 事
1	牛久保外部電源装置	外部電源装置 廃止	豊川市牛久保町 大手町 37-12	なし	2025 年 6 月 2025 年 10 月	2025 年 7 月 2025 年 10 月	なし	
2								
3								

2. 連絡先

企業名 サーラエナジー株式会社
部署名 供給保安部 供給企画グループ
担当者名 田畑 佑介
TEL 0 5 3 2 - 3 3 - 3 3 3 1
FAX 0 5 3 2 - 3 3 - 3 3 3 9

2025年10月22日

(金沢エナジー) 2025 年度 電気防食設備設置状況

1. 電気防食装置設置状況一覧

番号	防食路線(施設)名	防食設備内容	設置場所	関係事業者	着手予定年月	完了予定年月	通知事項	記 事
1	港外部電源装置	外部電源装置	石川県金沢市湊 3-6	なし	2025 年 6 月	2025 年 10 月	なし	なし

2. 連絡先

企業名 金沢エナジー株式会社
部署名 地域エネルギー供給部 ガス保安課
担当者名 三浦 鷹弘
T E L 070-1531-4070-1531-4899 (直通)
F A X 076-224-0131

以 上

2025 年 10 月 22 日
中部電食防止委員会

第 14 回実務者向け電食防止勉強会 開催報告

1. 開催日時：2025 年 9 月 26 日（金）13：30～17：00
2. 開催場所：東邦ガス株式会社 本社 安全技能研修センター 2F 第六教室
3. 受講者：33 名
4. 受講料：無料
5. 講習科目および講師等

	項目	内容	講師
1	基礎知識の習得	・ 金属の腐食について ・ 鉄道の歴史について ・ 電食による腐食について ・ 電食防止対策について ・ 電食防止設備（選択排流器）の設置に至るまで	㈱ナカボーテック
2	各種計測の体験学習	・ 電位測定 ・ 絶縁測定	㈱ナカボーテック

6. 予算

〔支出〕勉強会費：（予算）¥ 200,000
（実績）¥ 85,120

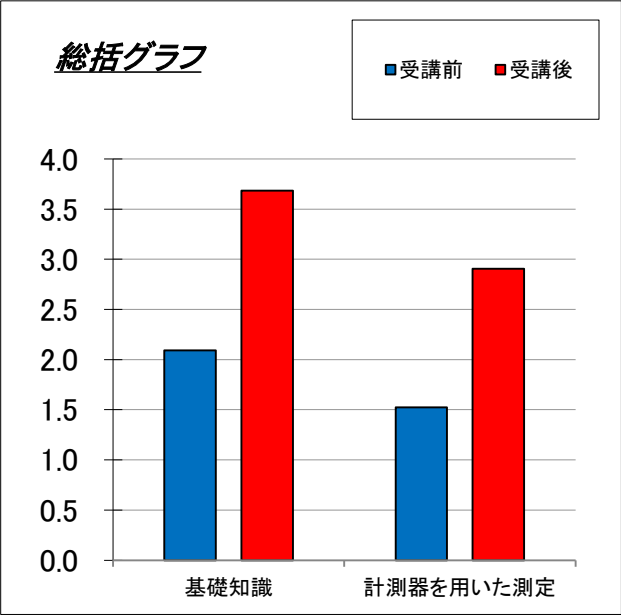
7. アンケート結果と分析

別紙参照

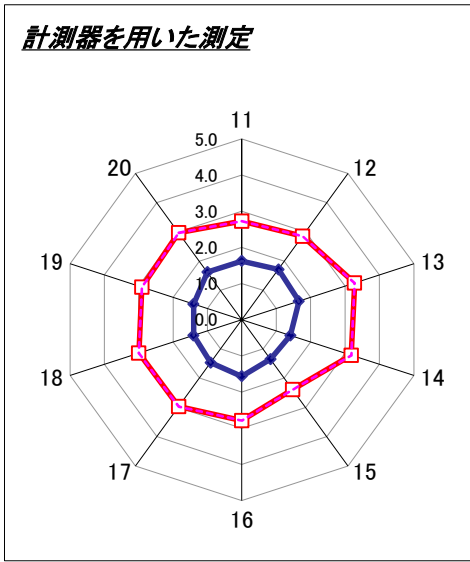
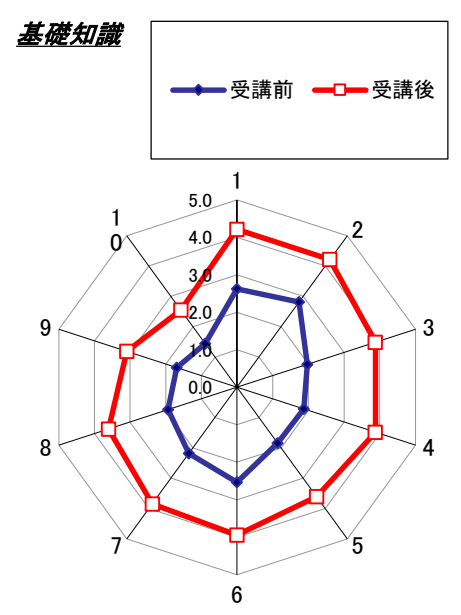
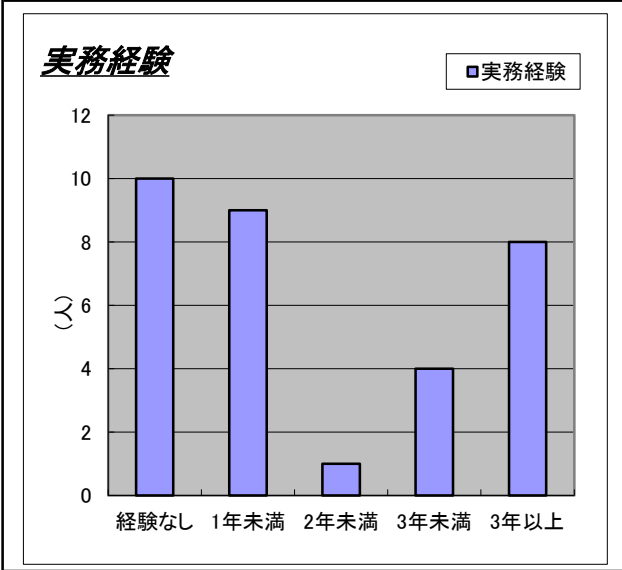
以上

<電食防止勉強会 アンケート結果集計>

受講No.	0	所属	全体	氏名	全体平均
-------	---	----	----	----	------



受講実績 平均:0.5回 最大:4回 最少:0回



設 問		受講前	受講後
基礎知識	1 腐食の分類を知っている	2.6	4.2
	2 自然腐食と電食の違いを知っている	2.8	4.2
	3 マクロセル腐食の例を挙げ、その仕組みを説明できる	2.0	3.9
	4 ミクロセル腐食の仕組みと特徴（腐食の形状）を知っている	1.9	3.9
	5 電食の原因と特徴（腐食速度、腐食の形状）を説明できる	1.8	3.6
	6 防食の分類を知っている	2.5	3.9
	7 代表的な防食方法（環境遮断、電気防食）の概要を知っている	2.2	3.8
	8 流電陽極方式と外部電源方式の長所、短所をそれぞれ説明できる	1.9	3.6
	9 直流電気鉄道と交流電気鉄道の違いを理解している	1.7	3.1
	10 電気設備施設に関する代表的な法令・基準の例を挙げられる	1.4	2.5
計測器を用いた測定	11 管対地電位、Mg陽極発生電流、絶縁測定のための結線ができる	1.6	2.7
	12 管対地電位測定が実施できる	1.7	2.8
	13 管対地電位測定における参照電極種を知っている	1.7	3.3
	14 管対地電位測定における参照電極換算値を知っている	1.4	3.2
	15 環境ごとに参照電極の使い分けができる	1.3	2.4
	16 Mg陽極発生電流測定が実施できる	1.6	2.8
	17 電流測定用シャント抵抗の換算ができる	1.5	3.0
	18 Mg陽極寿命が計算できる	1.4	3.0
	19 絶縁継手の絶縁チェックが実施できる	1.4	2.9
	20 各測定結果より、総合的に防食効果の判定ができる	1.6	3.0

勉強会アンケート結果概要

凡例

朱記: 改善意見

青記: 肯定意見

1. 総評

「わかりやすい」「勉強になった」等の肯定的な意見をいただきました。

腐食・防食に関する基礎的な座学学習と、防食電位や絶縁状態の測定の体験学習の複合形式によるカリキュラムにより、特に防食業務に関わる初学者や新任者にノウハウ提供ができたと感じています。

いただいたご意見につきましては、次回に活かして参りたいと存じます。

2. 講習内容に関する意見

＜座学・体験学習についての意見＞

基礎から学ぶことができ、実際に測定・記録することで理解が深まった。

事務局 → 理解が深まったとのご意見をありがとうございます。次回以降も今回と同様に、座学・体験学習の複合形式で、参加者が理解しやすい勉強会にしていきます。

計測方法の原理、座学で出てこなかった専門用語等を説明したうえで、体験学習を実施してほしい。

事務局 → 体験学習の内容で出てくる専門的事項については、体験学習前に参加者に対して説明するなど、講師の方とより分かりやすい内容にするように調整していきます。

勉強会時間を長くしてほしい（半日、1日など）。

事務局 → いただいたご意見は、勉強会の内容等を踏まえて、次回の勉強会での参考にさせていただきます。

＜勉強会及びテキストについてご意見・ご要望＞

参加者が実際計測をする時間を設けていただきたい。

事務局 → 勉強会時間の都合上、参加者が実際に計測時間はありませんでした。参加者が実際に計測をすることについては、勉強会の内容や時間を踏まえて、次回の勉強会での参考にさせていただきます。

テキストの電子データがいただけるならいただきたい（職場にて共有するため）。

事務局 → テキストは、講師の著作物であるため、電子データの配布はできかねますこと、ご了承ください。

2025 年 10 月 22 日

会員各位

中部電食防止委員会
会長 高橋 誠
関西電食防止対策委員会
委員長 松浦 虔士

第 66 回 中部・関西電食防止合同研究発表会 開催のご案内

拝啓 秋涼の候、ますますご清栄のこととお喜び申し上げます。

平素は、当委員会の事業運営に格別のご協力を賜り、厚くお礼申し上げます。

さて、恒例となりました研究発表会を下記のとおり開催する運びとなりました。

防食技術の更になる発展のため、ふるってご参加下さいますようご案内申し上げます。

なお、準備の都合上、勝手ながら 10 月 30 日 (木)までに、添付の「参加申込書」にご記入の上、ご回答いただきたくよろしくお願い申し上げます。

敬 具

記

1. 日 時 2025 年 11 月 17 日 (月)
 受付開始 12 : 30 ~
 発表会 13 : 30 ~
 情報交換会 17 : 30 ~

2. 場 所 オービック御堂筋ビル 2F オービックホール
 〒541-0046 大阪府大阪市中央区平野町 4 丁目 2-3 (ホールB、C)
 *別紙アクセスマップ参照

3. 発表内容 (6 件)
 - (1) 再生可能なコンクリート埋設型照合電極の開発
 <中部>日本防蝕工業株式会社 中澤 貴幸 氏、田代 賢吉 氏

 - (2) ステンレス鋼の不動態皮膜と表面改質
 <<賛助発表>>中国電食防止対策委員会 広島工業大学 教授 王 栄光 氏

 - (3) 亜鉛テープを用いた金属配管の防食
 <関西>株式会社ナカボーテック 八木 雄太 氏

(4) 長期陰分極下においた鋼の分極曲線とインピーダンス挙動
＜関西＞日本防蝕工業株式会社 技術研究所長 田代 賢吉 氏

(5) 水和膨張しない H^+ - O^{2-} 混合イオン導電体の発見と SDGs に貢献する電気化学
デバイスへの応用の可能性
＜中部＞中部大学 教授 橋本 真一 氏

(6) 土壌が酸性を呈する時、何がそうもたらしたか？
－世界に広く分布する酸性硫酸塩土壌－
＜賛助発表＞電食防止研究委員会 顧問 梶山 文夫 氏

4. 問合せ先

中部電食防止委員会 事務局
東邦ガスネットワーク株式会社 導管部 幹線センター 内
(事務局長) 安達 俊彰
(書 記) 前田 芳孝、野澤 皓平、近藤 美幸
TEL：052-872-9692
FAX：052-872-9497
E-mail：chudenbou@tohogas.co.jp

関西電食防止対策委員会 事務局
大阪ガスネットワーク株式会社
総合保安部 保全マネジメントチーム 防食グループ 内
(事務局長) 三宅 英之
(書 記) 西岡 昂洋、三島 昭二
TEL：080-2415-9054
FAX：06-6586-3357
E-mail：info@kandenshoku.org

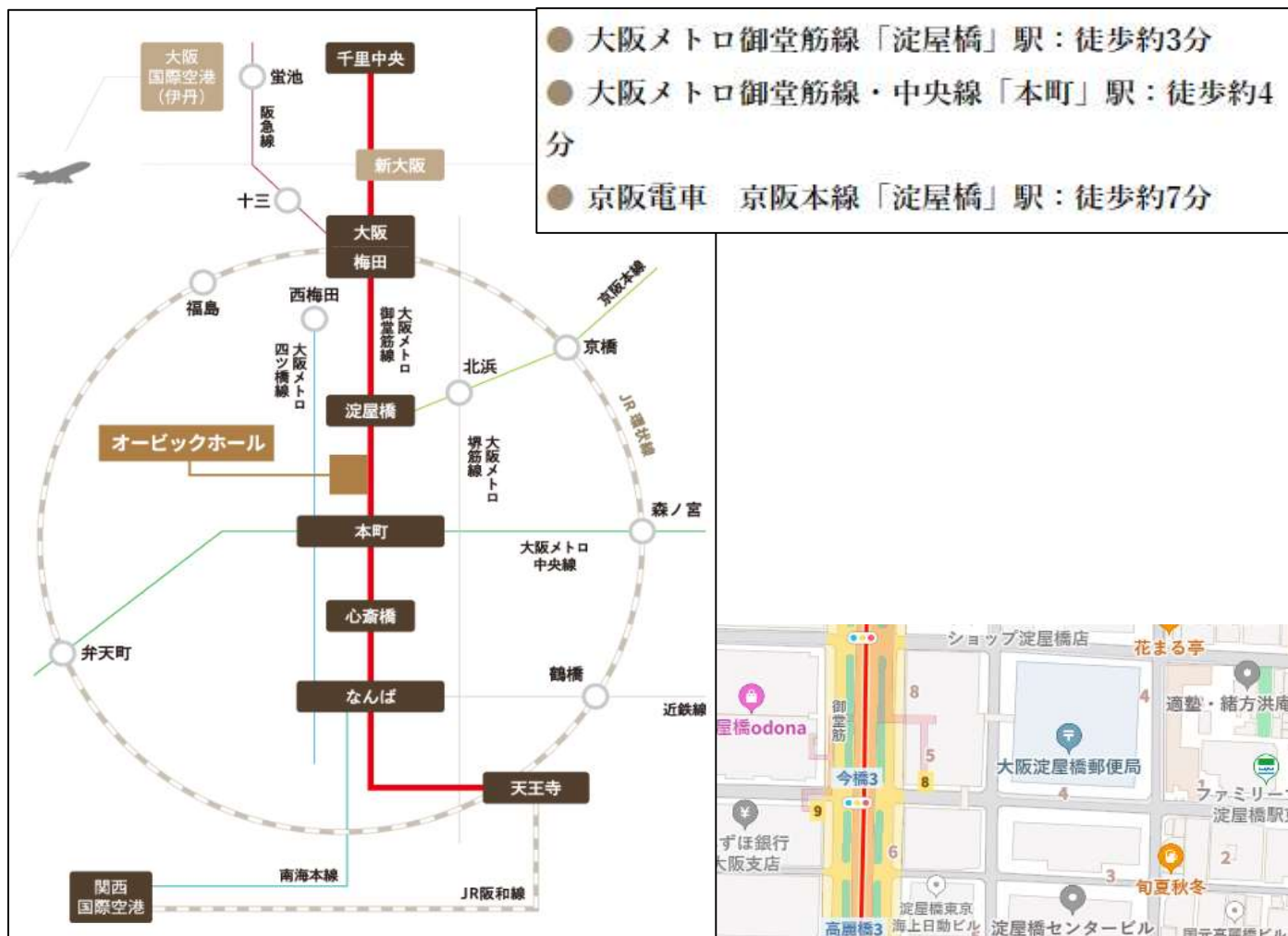
以上

オービックホール

〒541-0046 大阪府大阪市中央区平野町4丁目2-3 オービック御堂筋ビル2F

TEL. 06-6228-6500 (平日 9:00~19:00)

主要交通機関案内



オービックホール

各 位



資料No.2025-29

2025 年 10 月 30 日
中部電食防止委員会

第 53 回研修会について（お願い）

平素は、当委員会の事業運営にあたり格別のご高配を賜り、厚くお礼申し上げます。

さて、第 53 回研修会の開催にあたり、見学施設のリストアップを行いたく、貴事業者様で紹介いただける施設、他事業者・公共施設等見学希望先について、お手数ですが、添付エクセルを E メールにて事務局までご連絡をお願いします。

時節柄ご多忙のことと存じますが、ご高配いただきますようお願い申し上げます。

1. 研修会開催時期

2026 年 4 月頃

2. 昨年度のリストアップ

(1) 会員の施設で紹介いただけるものとしてリストアップされたもの

北野榊塚構内

・愛知環状鉄道

・輸送指令所（電気指令含む）

・電子連動継電器室（構内進路数=101）

・電鉄変電所（容量(4670 k VA) : DC=1500V AC=6600V)

・岐阜県都市建築部

中津川浄水場、山之上浄水場、川合浄水場

・J F E エンジニアリング

JFE スチール株式会社 知多製造所

(2) その他見学先の希望としてリストアップされたもの

・愛知環状鉄道 北野榊塚構内

・山梨県リニア見学センター

・リニア名古屋駅工事現場

・東邦ガス 高機能バイオ炭「宙炭」プラント施設

・名古屋鉄道 神宮前指令所

・NTT とう道 知多電力館

3. 近年の研修会見学先

- ・2014 年 4 月 17 日 大学共同利用機関法人 自然科学研究機構 核融合科学研究所
国土交通省 中部地方整備局 庄内川河川事務所 小里川ダム
名古屋市交通局 前津電気指令室・前津変電所
- ・2015 年 4 月 21 日 中部電力(株) 東清水変電所
- ・2016 年 4 月 12 日 とよたエコフルタウン、新舞子マリンパーク風力発電所
矢作建設工業株式会社 鉄道技術研修センター
- ・2017 年 4 月 14 日 名古屋市上下水道局 水の歴史資料館
衣浦東部浄化センター
へきなんたんトピア
- ・2018 年 4 月 13 日 岐阜県中津川浄水場
岐阜県釜戸小水力発電所
名古屋市交通局前津変電所
- ・2019 年 4 月 名古屋鉄道(株) 神宮前指令所
愛知県企業庁 犬山浄水場
N T T 西日本(株) データセンタ
- ・2024 年 4 月 中部電力(株) 浜岡原子力発電所
- ・2025 年 4 月 山梨県立リニア見学センター

4. 連絡先 中部電食防止委員会事務局

東邦ガスネットワーク株式会社

導管部 幹線センター内

担当：前田芳孝、野澤皓平、近藤美幸

TEL :052-872-9692 FAX:052-872-9497

E-mail: chudenbou@tohogas.co.jp

5. 締切り 2025 年 11 月 28 日（金）

以 上

研修会に関するアンケート

参加者数は40名を予定しております。

貸切バスにて、日帰りで移動可能な地域にて、ご回答いただけましたら幸いです。

【アンケート提出先】

中部電食防止委員会事務局

東邦ガスネットワーク株式会社

導管部 幹線センター内

前田、野澤、近藤行き

提出先アドレス：chudenbou@tohogas.co.jp

【アンケート内容】 添付エクセルにて回答をお願いします

①事業者名

②部署名

③氏名

④TEL

⑤貴事業者様の施設でご紹介いただけるもの（40名が見学可能な場所をご紹介ください）

⑥他事業者・公共施設等で見学先のご希望があればお書きください。

⑦その他 ご要望等ございましたらお書きください。

【締切：2025年11月28日（金）】

※Eメールでのご回答ができない場合は、上記①～⑦を記載の上、FAXにてご回答願います

FAX:052-872-9497

電食防止研究委員会 第156回 定例委員会議事録 (1/1) (案)

開催日時 令和7年5月14日(水) 13:30~15:00

開催場所 電気学会会議室及びzoom

東京都千代田区五番町6-2

1. 出席者

27名。(添付参加者名簿参照)

2. 議事概要

2.1 前回議事録承認(配布資料あり)

第155回定例委員会議事録(案)が報告され承認された。

2.2 定-612 ISO国際規格文書記述上の注意事項(配布資料あり)

ISO国際規格文書記述上の注意事項について梶山顧問より紹介がされた。

文章の中では、用語及び語句の統一は必須である。既存の他のISOとの整合性に気を付けなければならない。

用語は固有名詞であるので、勝手に用語を変えてはならない。異なる用語、語句は異なる意味の用語、語句を意味する。

2.3 定-613 硫酸塩還元菌(SRB)によって影響される鉄の腐食状態と速度(配布資料あり)

硫酸塩還元菌(SRB)によって影響される鉄の腐食状態と速度について梶山顧問より紹介がされた。

本論文は「防錆管理/2025-2」に掲載されたものである。

硫酸塩還元菌(SRB)の活動は、鋼や鋳鉄の鉄系材料に対して、激しい腐食をもたらすのか、それとも腐食を抑制するのか、本論文は硫酸塩還元菌(SRB)によって影響される鉄の腐食状態と速度について述べられている。

2.4 定-614 光ファイバセンシングによる地中空洞検知プロジェクト(配布資料あり)

光ファイバセンシングによる地中空洞検知プロジェクトについてNTT東日本宮脇様、法月様より紹介がされた。

光ファイバセンシングとは光ファイバをセンサとして活用し、温度、歪、振動などを測定(センシング)することで、光ファイバにそって連続的に測定を行う事が出来る。

地中空洞検知は、地下に敷設してある光ファイバによって空洞の有無による振動特性の変化により検知を行う。

本プロジェクトは2025年2月に始動し、今後実現性を検証していく。

2.5 定-615 硫酸塩還元菌が存在する鉄の嫌気性環境における第一鉄イオンとリン酸イオンの確かな役割(配布資料あり)

硫酸塩還元菌が存在する鉄の嫌気性環境における第一鉄イオンとリン酸イオンの確かな役割について梶山顧問より紹介がされた。

Feが硫酸塩還元菌(SRB)とリン酸イオンが存在する電解質中にあり、Feの初期の酸化過程から還元過程に環境変化する場合、Fe表面に腐食を抑制するFeS被膜が生成されないため、Feは嫌気性腐食が進行する。

また、酸化過程で生成した FePO_4 は還元されて $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$ になり、フリーの PO_4^{3-} が電解質中に溶出しリンの富栄養化現象が起こると、赤潮の発生などの海洋汚染が誘起されうる。

2.6 その他、事務局連絡

ホームページ分科会活動報告、ホームページ改定及びパスワードの連絡(畠中委員長)

今後の会議日程の伝達。(竹葉幹事)

【次回開催案内】第156回 定例委員会

開催日時: 令和7年 7月23日(水) 13:30~

開催場所: 電気学会会議室及び zoom

電食防止研究委員会 第155回 定例委員会 出席者名簿

令和7年5月14日（水）

	役職	氏名	所属団体・企業	出欠	代理出席者・同行者 所属・氏名
1	委員長	畠中 省三	JFEエンジニアリング(株) 導管事業部 導管技術部	○	
2	副委員長	小西 武史	公益財団法人 鉄道総合技術研究所 電力技術研究部 き電	○	
3	副委員長	深谷 朝之	日本防蝕工業(株) 東京支店 第二技術部	○	
4	会計 監事	中村 康朗	東京ガスネットワーク(株) 技術革新部 技術統括グループ	○	
5	会計 監事	山田 健太郎	関東鉄道協会 [小田急電鉄(株)]	○	
6	顧問	梶山 文夫	東京電蝕防止対策委員会	○	
7	幹事 (庶務)	竹葉 康之	(株)ナカポーテック 東京支店 地中・陸上担当部	○	
8	委員 (会計)	山野 剛	日本防蝕工業(株) 東京支店 第一技術部	○	
9	幹事 (企画)	品川 尚史	(株)ジェイアール総研電気システム 電力部		
10	幹事	土淵 孝浩	東京地下鉄(株) 電気部 電力課	○	
11	幹事	久野 泰史	(株)ナカポーテック 技術統括部 技術部	○	
12	委員	折口 壮志	NTT東日本技術協力センタ	○	宮脇様、法月様（議題発表で参加） 伊東様（webで参加）
13	委員	三島 昭二 (代理：大阪ガス 西川様)	大阪ガスネットワーク(株) 総合保全部 保全マネジメントチーム 防食グループ	○	代) 西川様
14	委員	田中 裕	公益財団法人 鉄道総合技術研究所 鉄道国際規格センター		
15	委員	山川 唯人	東日本旅客鉄道(株) 電気ネットワーク部 保安・電路G	○	
16	委員	橋本 康功	東日本旅客鉄道(株) JR東日本研究開発センター テクニカルセンター	○	
17	委員	清水 歩	東海旅客鉄道(株) 総合技術本部 技術開発部	○	
18	委員	吉田 修	西日本旅客鉄道(株) 電気部 電気課	○	
19	委員	生越 啓史 日沼 利栄	東京都交通局 事務局：車両電気部電力課	○	
20	委員	石川 稔	関西鉄道協会 [阪急電鉄(株)]	○	
21	委員	西尾 和晴	中部鉄道協会 事務局長 窓口 小塚 仁史	○	代) 松本様
22	委員	前田 亮	一般社団法人 日本ガス協会 技術部	○	

敬称略 (1/2ページ)

電食防止研究委員会 第155回 定例委員会 出席者名簿

令和7年5月14日（水）

[illegible]

敬称略

(2 / 2 ページ)

ISO 国際規格文書記述上の注意事項

梶 山 文 夫*

Fumio KAJIYAMA

2024年7月1日、Pメンバーによる投票の結果、現在、鋼及び鋳鉄のパイプライン等のインフラの防食電位として広く用いられているカソードの防食電位 -0.85 V （飽和硫酸銅電極基準）を定めた、ISO 15589-1 Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Cathodic protection of pipeline systems — Part 1: On-land pipelinesがDISとして承認された。ISO 15589-1は、2015年3月、第2版として刊行されたが、2020年6月、SR（Systematic review、定期見直し）が行われ、引き続き改正作業が行われている。DISとして承認され、次段階に進むことになったが、フランスとイギリスが反対した。2カ国の反対理由は、かなり字句に関するものが多くみられ、ISO 国際規格文書記述上の注意事項として、大いに我々の参考になるので、具体的に反対理由をあげながらその内容について考えてみることにする。

キーワード：ISO 15589-1, 過分極, クーボン, 交流腐食

1. はじめに

2024年7月1日、Pメンバーによる投票の結果、現在、鋼及び鋳鉄のパイプライン等のインフラの防食電位として広く用いられているカソードの防食電位 -0.85 V （飽和硫酸銅電極基準）を定めた、ISO 15589-1 Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Cathodic protection of pipeline systems — Part 1: On-land pipelinesがDISとして承認された¹⁾。ISO 15589-1は、2015年3月、第2版として刊行されたが²⁾、2020年6月、SR（Systematic review、定期見直し）が行われ³⁾、引き続き改正作業が行われている。DISとして承認され、次段階に進むことになったが、フランスとイギリスが反対した。2カ国の反対理由は、かなり字句に関するものが多くみられ、ISO 国際規格文書記述上の注意事項として、大いに我々の参考になるので、具体的に反対理由をあげながらその内容について考えてみることにする。

2. ISO 国際規格文書記述上の注意事項

2.1 本文中の略語の定義又は解説の付記

2.1.1 飽和硫酸銅電極の標準水素電極に対する換算式

本文表1の注意事項に飽和硫酸銅電極の標準水素電極に対する換算式として「 $ECU = EH - 0.32\text{ V}$ 」 $- 0.32\text{ V}$ 」の記述がある。ECU、EHとも本文中に定後、解説がない。標準水素電極の略語はNHEであることから、「 $E_{CSE} = E_{NHE} - 0.32\text{ V}$ 」としなければならない。ここで、CSEとNHEは基準であることから、下付きで表記した。

2.2 本文中に記述の無い用語

本文4.2 略語の中にSCE saturated calomel reference electrodeの記述がある。本文中にこの電極に関する記述はない。また、現在、この電極は用いられていない。よって、この電極は、本文から削除しなければならない。

2.3 正確な用語の記述

2.3.1 過分極の概念

本文中6. Cathodic protection criteria（カソード防食基準）に「Application of potentials that are too negative can result in cathodic over-protection leading to coating disbondment and blistering and hydrogen embrittlement of some metals.（あまりにもマイナスの電位の適用は、いくつかの金属のコーティング剥離、ふくれ及び水素脆化を誘起するカソードの過防食となる。）」とある。2020年のSRの時点ではパイプラインの交流腐食のISO 国際基準はなかったが、1980年代中頃

* 電食防止研究委員会（〒262-0025 千葉県千葉市花見川区花園2-8-12）工学博士

Study committee of stray-current corrosion control (2-8-12, Hanazono, Hanamigawa-ku, Chiba, 262-0025, Japan) Dr. Eng.

から欧米で発生したパイプラインの交流腐食をきっかけに ISO 活動として交流腐食現象の解明、交流腐食防止基準の策定作業が進められた。作業の成果としてカソード分極の程度が大きいと、交流腐食リスクが高いことが明らかになった。2019 年、交流腐食防止基準が ISO 18086 として刊行された⁴⁾。交流腐食リスク評価にはパイプラインのコーティング欠陥を模擬したクーボンを用いることが有効なことから、2020 年 2 月、ISO 22426 が刊行された⁵⁾。この ISO でそれまでの過防食 (over-protection) に代わって過分極 (over-protection) が用語として定義された。なお、これまで過防食の定義はない。過分極の定義は以下の通りである。「achievement of the structure to electrolyte potentials that are more negative than required for the control of corrosion that can damage coatings, increase AC corrosion rate or, particularly for high yield strength steels, enhance the tendency to crack. コーティングに損害を与える、交流腐食速度を増大させる、又は特に高い降伏応力鋼に対して割れの傾向を増大しうる腐食の防止のために要求されるよりもっとマイナスである構造物対電解質電位の達成。」過度のカソード分極はこれまで警告された内容に加えて交流腐食速度が大きくなりうることを特に高張力鋼に対して注意喚起するものである。過分極が記述された ISO 22426 は、同年刊行された用語定義集の ISO 8044 には反映されていない⁶⁾。後述する 2.3.3 も考慮し、原文を以下に修正する必要がある。

「Application of potentials that are too negative can result in cathodic over-polarization leading to a.c. corrosion as well as coating disbondment and blistering and hydrogen embrittlement of high strength non alloyed and low alloyed steels with specified minimum yield strength exceeding $550 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ 」。

2.3.2 飽和硫酸銅電極

本文中表 1 の注意事項に、飽和硫酸銅電極として「copper/saturated copper sulfate reference electrode」とある。本文中 4.2 略語で、「飽和硫酸銅電極 CSE copper-copper sulphate (saturated) reference electrode」とある。sulfate から sulphate の修正を含めて (イギリス英語に統一) 略語の記述に統一しなければならない。

2.3.3 高張力鋼

本文中表 1 の注意事項に、高張力鋼の水素脆化の防止に関する記述がある。防止の対象は、「yield strength

exceeding $550 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ 」とあるが、「specified minimum yield strength exceeding $550 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ 」としなければならない。公称最小降伏応力が正確な用語であるので、specified minimum が必要である。

2.4 現在用いられていない技術

Annex D (informative) Description of specialized surveys で Pearson survey (or ACVG) の記述があるが、この調査は手間がかかるので現在用いられていないので削除。ACVG の解説と最新の調査方法が必要。

2.5 参考文献

Annex F に「See Ceocor recommendation named "Isolating joints for gas pipelines" for detailed information. とあるが、Ceocor は本国際会議に登録しないと閲覧できない。Bibliography [3] にも同様にみられる参考文献は、誰でも閲覧可能であるものをあげなければならない。

3. まとめ

- 1) 文書の中では、用語及び語句の統一は必須である。既存の他の ISO との整合性に気を付けなければならない。用語は固有名詞であるので、勝手に用語を変えてはならない。異なる用語、語句は、異なる意味の用語、語句を意味する。
- 2) 得られた知見により、「過分極」という用語が導入された。用語は規格と共に生きている。

参考文献

- 1) ISO/TC 67/SC 2 N 1761, "Voting results ISO DIS 15589-1" (2024).
- 2) ISO-15589-1, "Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Cathodic protection of pipeline systems —Part 1: On-land pipelines", Second edition (2015).
- 3) ISO/TC 67/SC 2 N 1363, "Result of systematic review of ISO 15589-1:2015 "Petroleum, petrochemical and natural gas industries. Cathodic protection of pipeline systems, Part 1: On-land pipelines" (2020).
- 4) ISO 18086, "Corrosion of metals and alloys — Determination of AC corrosion — Protection criteria", Second edition (2019).
- 5) ISO 22426, "Assessment of the effectiveness of cathodic protection based on coupon measurements" (2020).
- 6) ISO 8044, "Corrosion of metals and alloys — Vocabulary" (2020).

受理日：令和 6 年 7 月 9 日

解説

硫酸塩還元菌 (SRB) によって影響される鉄の腐食状態と速度

梶山 文夫*

Fumio KAJIYAMA

1934年、オランダの Kühr と Vlugt によって提案された土壤中に埋設された鉄の腐食反応のメカニズムであるカソード復極説は、硫酸塩還元菌 (SRB) 活動が鉄の激しい腐食をもたらすものとしてあげられた。しかしながら、実際の鉄の腐食速度とカソード復極説を結びつける腐食データがないことから、いまだ SRB の腐食反応に及ぼす影響は明らかになっていないといえない。SRB は、硫酸イオンを硫化物に還元する微生物である。硫酸イオンは、我々に身近な土壌、海水中に存在し、SRB の活動の結果、わかりやすい硫化水素や硫化鉄が生成する。以上より、SRB は我々の興味の対象の微生物となる。SRB の活動は、鋼や鉄の鉄系材料に対して、激しい腐食をもたらすのか、それとも腐食を抑制するのか、本稿は、硫酸塩還元菌 (SRB) によって影響される鉄の腐食状態と速度についてせまる。

キーワード：鉄、土壌、硫酸塩還元菌、腐食状態、腐食速度

1. はじめに

1934年、オランダの Kühr と Vlugt によって提案された土壤中に埋設された鉄の腐食反応のメカニズムであるカソード復極説¹⁾は、硫酸塩還元菌 (SRB) 活動が鉄の激しい腐食をもたらすものとしてあげられた。しかしながら、実際の鉄の腐食速度とカソード復極説を結びつける腐食データがないことから、いまだ SRB の腐食反応に及ぼす影響は明らかになっていないといえない。SRB は、硫酸イオンを硫化物に還元する微生物である。硫酸イオンは、我々に身近な土壌、海水中に存在し、SRB の活動の結果、わかりやすい硫化水素や硫化鉄が生成する。以上より、SRB は我々の興味の対象の微生物となる。SRB の活動は、鋼や鉄の鉄系材料に対して、激しい腐食をもたらすのか、それとも腐食を抑制するのか、本稿は、硫酸塩還元菌 (SRB) によって影響される鉄の腐食状態と速度についてせまる。

2. 硫酸塩還元菌 (SRB) によって影響される鉄の腐食状態と速度

2.1 高活性の SRB が生息する嫌気性培養液中の鉄の腐食速度

表1は、14日間にわたる高活性の SRB が生息する空

素雰囲気下の嫌気性液体培地中のダクタイル鉄試験片と無菌状態の液体培地中のダクタイル鉄試験片の腐食実験の結果を示したものである²⁾。SRB は、*D. desulfuricans*、発酵研究所 IFO 13699 を用いた。14日間は、予備実験において SRB の増殖速度をとらえた結果を基に、誘導期から定常期までの範囲をねらって腐食実験を行った。液体培地は、Postgate の B 培地³⁾を用いた。質量減少から求めた腐食速度は、SRB が生息している場合は 0.008 mm/y、無菌の場合は 0.011 mm/y でいずれも腐食速度は非常に小さかったが、SRB が生息している場合は無菌の場合よりもさらに小さい値を示した。表1より経時的に Eh の低下、pH の上昇となり、実験開始時よりさらに嫌気性状態へと変化した。14日後の SRB の生菌数は 1×10^7 cells/ml を示し、実験期間中 SRB の活性が高いことを裏づけた。高活性の SRB が生息している場合、ダクタイル鉄の腐食速度が小さかったのは図1に示すように、経時的な電極電位が無菌の場合よりもプラスよりの値であり、この現象は SRB によってダクタイル鉄表面に生成された FeS がプラスよりの値を示すこと⁴⁾を反映したものと考えられる。

2.2 SRB が生息する培養液が嫌気性状態から好気性状態に環境変化した時の軟鋼の腐食速度

1984年、Hardy と Brown は、嫌気性の SRB 培養液の

* 電食防止研究委員会 (〒262-0025 千葉県千葉市花見川区花園2-8-12) 工学博士

Study committee of stray-current corrosion control (2-8-12, Hanazono, Hanamigawa-ku, Chiba, 262-0025, Japan) Dr. Eng.

表1 *D. desulfuricans*を接種したPostgate B培養液及び無菌のPostgate B培養液の実験開始時と終了時の特性値及び各ケースの腐食速度

	Eh (mV vs. SHE)		pH		<i>D. desulfuricans</i> の 生菌数	腐食速度 (mm/y)
	開始時	終了時	開始時	終了時	終了時	
<i>D. desulfuricans</i> を接種した Postgate B培地	-78	-269	7.00	7.83	1×10 ⁷	0.008
無菌のPostgate B培地	-31	-274	7.00	7.53	—	0.011

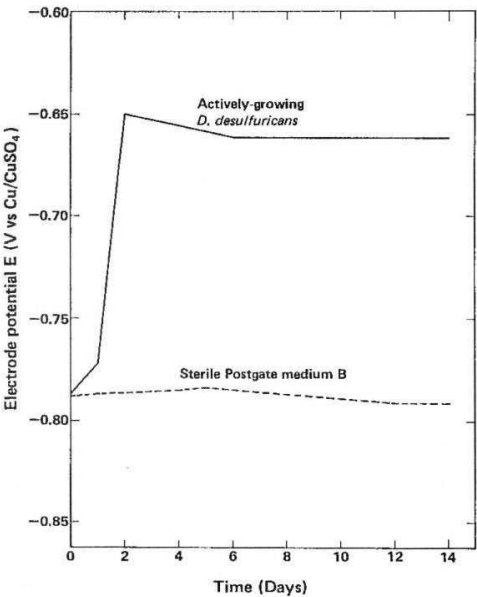


図1 ダクタイル鋳鉄を*D. desulfuricans*を接種したPostgate B培養液に浸漬した場合と、無菌のPostgate B培養液に浸漬した場合の電極電位の経時変化

Actively-growing *D. desulfuricans* : 高活性な*D. desulfuricans*
Sterile Postgate medium B : 無菌のPostgate B 培地
Electrode potential : 電極 (ダクタイル鋳鉄) 電位

7日間の軟鋼の腐食速度は、その質量減少から1.45 mg/dm²/day (0.0067 mm/y) と小さかったが、その後、空気にさらすと129 mg/dm²/day (0.60 mm/y) もの大きい腐食速度がもたらされたことを発表した⁵⁾。激しいSRB腐食には、好気性環境を成す空気が要求されることを示したものである。

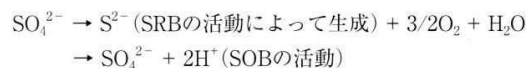
2.3 SRB及びSOBが生息する自然水状態土壌と冠水状態土壌のダクタイル鋳鉄の腐食挙動と腐食速度⁶⁾

表2は、SRBが生息している自然水状態土壌と冠水状態土壌におけるダクタイル鋳鉄の実験開始時と終了時における特性値及び各ケースの質量減少から求めた腐食速度を示したものである。実験開始時のEhが0.399 V_{SHE}、pHが6.61に対して、窒素ガスを吹き込んだ自然水状態の実験終了時のバルクのEhが0.509 V_{SHE}、pHが5.52と経時的に好気性状態への移行を反映する結果が得られた。実験開始時の生菌数はSRBが5×10⁵、SOBが2×10 cells/gであったが、これに対して実験終了時の鋳鉄/土壌界面のSRBは1×10⁴と1桁小さくなり、SOBは3×10²と1桁大きくなった。嫌気性環境でSRBにより生成したFeSが、経時的に好気性環境への環境変化により硫酸化細菌 (SOB) の活性が高くなり、下式のようにH₂SO₄が生成され⁷⁾、鉄の腐食が誘起される可能性がある。鋳鉄の腐食速度は、0.102 mm/yであった。

表2 SRBが生息している自然水状態土壌と冠水状態土壌におけるダクタイル鋳鉄の実験室試験の開始時と終了時における特性値及び各ケースの質量減少から求めた腐食速度

特性値		開始時	終了時			
			自然水状態		冠水状態	
			鋳鉄/土壌界面	バルク	鋳鉄/土壌界面	バルク
Eh (V _{SHE})		0.399 (0.439)	0.444	0.509	0.074	0.259
pH		6.61 (6.62)	4.86	5.52	6.46	6.22
Fe ²⁺ (mass ppm)		12	945	30	1074	402
FeS (mass ppm)		10	44	93	480	64
微生物の生菌数 (cell/g)	SRB	5×10 ⁵	1×10 ⁴	2×10 ⁶	2×10 ⁵	5×10 ³
	SOB	2×10	3×10 ²	7×10 ²	0	4×10 ²
質量減少より求めた腐食速度 (mm/y)			0.102		0.0093	

() : 冠水状態の実験開始時の値

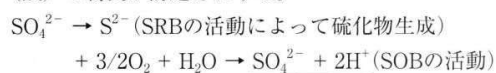


また、SRBが生息する土壌を滅菌した蒸留水で冠水状態にし、窒素ガスを吹き込んだ腐食実験を行った。経時的な冠水状態の嫌気性状態への移行は、実験終了時の鑄鉄／土壌界面のEhが0.074 V_{SHE}と低く、FeSが480 mass ppmの高い濃度を示したことによって裏づけられている。高い濃度のFeSは、鑄鉄表面に腐食を抑制するFeS沈殿皮膜の生成を意味することから、冠水状態の鑄鉄の腐食速度は自然水状態より1桁小さい0.01 mm/yの低い値を示したものと考えられる。

3. まとめ

- 1) 最もSRBの活性が高いと考えられる中性の嫌気性培養液（Postgate B培地）に浸漬されたダクタイル鑄鉄の腐食速度は極めて小さい。これは、SRBの活動によりFeS沈殿皮膜がダクタイル鑄鉄表面に生成され、腐食を抑制するものと考えられる。
- 2) SRBが生息する嫌気性培養液中の軟鋼（鉄）の腐食速度0.0067 mm/yは、空気にさらされた好気性状態に環境変化すると0.60 mm/yと大きくなる。
- 3) SRBが生息する土壌を滅菌した蒸留水で冠水状態にし、窒素ガスを吹き込むと土壌はさらに嫌気性状態に移行した。この場合、鑄鉄／土壌界面は生菌数の多いSRB活動でFeS濃度が増し、鑄鉄表面にFeS沈殿皮膜が生成したことにより、鑄鉄の腐食速度は0.01 mm/yの低い値を示した。
- 4) SRB及びSOBが生息し、窒素ガスが吹き込まれた自然水状態土壌は、経時的にSRBによるFeSがSOBのエネルギー獲得反応によってH₂SO₄が生成され、鑄鉄／土壌界面のpHは低下し、鑄鉄が腐食されうる。鑄鉄の腐食速度は0.1 mm/yと冠水状態のそれよりも1桁大きくなった。すなわち、SRB及びSOBが生息する嫌気性状態にある土壌がEhの上昇、pHの低下となる好気性状態に環境変化すると、SOBの活性が高くなり、SOBはSRBにより生成された硫化物をエネルギー源として利用でき、下式のようにH₂SO₄が生成され、ダクタイル鑄鉄（鉄）の腐食が誘起されうる。

態のそれよりも1桁大きくなった。すなわち、SRB及びSOBが生息する嫌気性状態にある土壌がEhの上昇、pHの低下となる好気性状態に環境変化すると、SOBの活性が高くなり、SOBはSRBにより生成された硫化物をエネルギー源として利用でき、下式のようにH₂SO₄が生成され、ダクタイル鑄鉄（鉄）の腐食が誘起されうる。

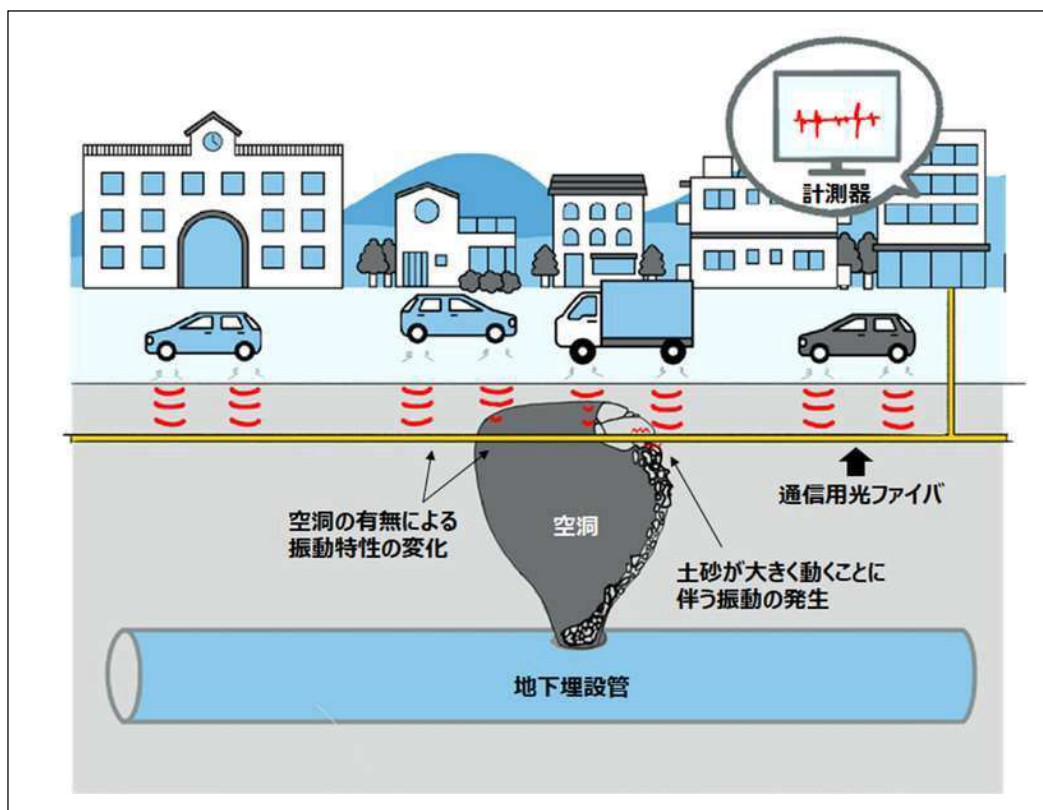


参考文献

- 1) C. A. H. von Wolzogen Kühr, L. S. van der Vlugt, "DE GRAFITEERING VAN GIETIJZER ALS ELECTRO-BIOCHEMISCH PROCES IN ANAEROBE GRONDEN", WATER, ssp.147 ~ 165 (1934).
- 2) 梶山文夫, "電気化学的手法を用いた鉄管の土壌腐食に関する研究", 東京工業大学博士論文 (1989).
- 3) J. R. Postgate, "The Sulphate-reducing Bacteria", Cambridge University Press (1979).
- 4) G. Wranglén, "Review Article on the Influence of Sulphide Inclusions on the Corrodibility of Fe and Steel", Corrosion Science, 9, pp.585 ~ 602 (1969).
- 5) J. A. Hardy, J. L. Brown, "The Corrosion of Mild Steel by Biogenic Sulfide Films Exposed to Air", Corrosion, 40, 12, pp.650 ~ 654 (1984).
- 6) 梶山文夫, "土壌中の硫酸塩還元菌によるFe基合金材料の腐食研究の変遷", 防錆管理, 49, No.4, pp.150 ~ 161 (2005).
- 7) 今井和民, "生命現象への化学的アプローチ 独立栄養細菌", 化学同人, p.63 (1984).

受理日：令和6年7月3日

NTT 東、既存の光ファイバーを利用して 地中空洞を検知するプロジェクト



NTT 東日本は、地下に敷設してある通信用光ファイバーを活用し、路面の空洞検知を実現する検証プロジェクトを2月13日に開始する。空洞の早期発見に役立て、路面陥没リスクの低減を目指す。

都市部や住宅街では道路下に水道/ガス/電気/通信などの地下管路が多く設置されており、これらの劣化が原因で路面下に空洞が発生した場合に重大事故につながる恐れがある。空洞が原因と見られる道路陥没は年間で1万件以上発生している一方で、現状では地下2m程度以上の非開削で確認するのが難しいため、空洞の発見が大きく遅れることが懸念される。

そこで、NTT 東日本では同社が保有する地下の通信用光ファイバーを振動センサーとして活用。流域下水道といった大型地下埋設管と並行して敷設されている通信用光ファイバーの片端にセンシング装置を取り付け、周辺の地盤を経由して伝わってくる自動車などの走行に起因する振動データを収集する。

そして収集したデータを、大学などの研究機関と連携して分析し、前後の時間との振動特性を比較することにより、空洞の発生を検知したり、過去から存在していた空洞を検知したりすることの実現性を検証する。

この検出方法では、新たなセンサーの設置が不要で、無給電で通信用光ファイバーのルートに沿った区間を連続的にモニタリング可能。また、地表からの検査技術と比較した場合、深い地点の地中振動特性の変化を高精度で、かつ人手を介さずに常時(24時間365日)モニタリングし続けられるのが特徴。

一方で、検証を完遂するには、検知したデータに基づき自治体と協働で実際に空洞有無を確認する必要があるため、今後、実証パートナーとなる自治体との共同検証体制の構築に取り組むという。なお、本プロジェクトの始動に先駆けて、埼玉県の一部エリアにおける振動データの収集を開始しているという。

解説

硫酸塩還元菌が存在する鉄の嫌気性腐食における第一鉄イオンとリン酸イオンの確かな役割

梶山 文夫*

Fumio KAJIYAMA

Fe が SRB (硫酸塩還元菌) とリン酸イオンが存在する電解質中にあり、Fe の初期の酸化過程から還元過程に環境変化する場合、Fe 表面には腐食を抑制する FeS 皮膜が生成されないで、Fe は嫌気性腐食が進行する。また、酸化過程で生成した FePO_4 は還元されて $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$ になり、フリーの PO_4^{3-} が電解質中に溶出しリンの富栄養化現象が起こると、赤潮の発生、植物性プランクトンの繁殖により、港湾・海洋汚染が誘起されうる。

キーワード：嫌気性腐食、硫酸塩還元菌、鉄、硫化鉄、第一鉄イオン、リン酸イオン、硫化物イオン、港湾・海洋汚染

1. はじめに

硫酸塩還元菌 (SRB) は、中性の嫌気性環境で SO_4^{2-} を S^{2-} に還元する微生物であるが、この反応が起きるためには後述するように段階的に進行する微生物学的還元過程を経なければならない。 Fe^{3+} が Fe^{2+} に還元されて Fe^{2+} が溶出して SRB の活動によって S^{2-} が生成するのである。この時、 S^{2-} はすでに電解質中に溶出している Fe^{2+} とすぐに反応して難溶性の FeS (溶解度積 1.59×10^{-19}) を生成するが、問題は FeS がどこに生成するのか、すなわち、FeS が金属表面上に生成するのか、バルクの電解質中に生成するのか、金属表面上に生成した FeS は腐食抑制機能があるのかである。

Fe が SRB とリン酸イオンが存在する電解質中にあり、Fe の初期の酸化過程から還元過程に環境変化する場合、Fe 表面には腐食を抑制する FeS 皮膜が生成されないで、Fe は嫌気性腐食が進行する。また、酸化過程で生成した FePO_4 は嫌気過程で還元されて $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$ になり、フリーの PO_4^{3-} が電解質中に溶出しリンの富栄養化現象が起こると、赤潮の発生、植物性プランクトンの繁殖により、港湾・海洋汚染が誘起されうる。これまで、SRB とリン酸イオンとの関係を示した論文は多くない。1968 年、Iverson は SRB である *Desulfovibrio desulfuricans* による鉄の腐食と鉄リン酸化合物の形成につ

いて論文を発表した¹⁾。また、Iverson は、嫌気性腐食は、部分的に保護性のある硫化物の欠陥の存在のみならず、嫌気性環境に添加した Fe^{2+} によってリン酸塩が腐食過程を開始を可能にし、刺激されることを報告している²⁾。

本稿では、上記現象について港湾・海洋汚染も含めて解説する。

2. 微生物学的還元過程

嫌気性土壌における微生物代謝は、表 1 に示すように段階的に進行する³⁾。すなわち、「分子状酸素の消失」→「亜硝酸、硝酸が窒素ガスに還元されて消失」→「 Mn^{4+} が Mn^{2+} に還元されて、 Mn^{2+} が溶出」→「 Fe^{3+} が Fe^{2+} に還元されて、 Fe^{2+} が溶出」を経て酸化還元電位 Eh が低下し、 SO_4^{2-} が S^{2-} に還元される SRB が活動するための環境が醸成されて、この菌により硫化物が生成することになる。梶山は、活性の高い SRB に埋設された実験室試験のダクタイル鋳鉄クーボンとフィールド調査のダクタイル鉄管の Fe 表面上を電子プローブマイクロアナライザ (electron probe micro analyzer, EPMA) で元素分析を行った結果、Fe 酸素化合物が Fe 表面側に、Fe 硫化物がその外側のバルク側に生成することを示した^{4),5)}。実験室試験は、粘土にフィールドの硫化物と SRB の培養で用いられる Postgate B 液体培地を加えた

* 電食防止研究委員会 (〒262-0025 千葉県千葉市花見川区花園 2-8-12) 工学博士

Study committee of stray-current corrosion control (2-8-12, Hanazono, Hanamigawa-ku, Chiba, 262-0025, Japan) Dr. Eng.

表1 微生物学的還元過程³⁾

	物質変化	開始時期の 土壌 Eh、V _{SHE}	予想される微 生物のエネル ギー代謝形式	アンモニア の生成	炭酸生成	有機分解形式 (仮説)	
嫌気性 ↓	分子状酸素の消失	+0.6 ~ +0.5	酸素呼吸	活発に進行 する	活発に進行する	好気的及び半嫌 氣的 分解過程	第一段階
	硝酸の消失	+0.6 ~ +0.5	硝酸還元				
	Mn ²⁺ の生成	+0.6 ~ +0.4	Mn ⁴⁺ の還元				
	Fe ²⁺ の生成	+0.5 ~ +0.3	Fe ³⁺ の還元				
	硫化物の生成	0 ~ -0.19	硫酸還元	緩慢に進行 する	緩慢に生成増大 するか、停滞な いし減少する	嫌氣的分解過程	第二段階
	水素の生成	-0.15 ~ -0.22	発酵				
	メタンの生成	-0.15 ~ -0.19	メタン発酵				

電解質中に面積 6 cm² のダクトイル鉄鉄コーポンを 146 日間、N₂ 雰囲気中で静置した。試験後の pH は 8.4、Eh は -0.282 V_{SHE}、SRB の生菌数は $>2 \times 10^6$ /g-soil であった。Postgate B 液体培地⁶⁾ には、リン酸二水素カリウム KH₂PO₄ が含有されていることに注目すべきである。図 1 は、Fe 表面上の元素分析結果を示したものである⁴⁾。フィールド調査は、16 年間粘土質土壌に埋設されていた呼び径 150 mm のダクトイル鉄管である。掘削時の管周り土壌の pH は 6.00、Eh は -0.001 V_{SHE}、SRB の生菌数は 1×10^4 /g-soil であった。図 2 は、Fe 表面上の元素分析結果を示したものである⁵⁾。SE は二次電子像のことで、分析対象が明らかになっている。図 1 及び図 2 より、Fe 酸素化合物が Fe 表面側に、Fe 硫化物がその外側のバルク側に生成したことがわかる。まず Fe 表面で Fe 酸素化合物が生成され、嫌気性段階の早い段階で酸素が消失したことを意味する。フィールド調査の結果、最大腐食速度は、0.20 mm/y であった。いずれも Fe 硫化物は緻密で Fe 酸化物との密着性は良好であるといえる。図 3 は、フィールド調査の Fe 上の生成物の X 線回折結果を示したものである。硫化物として最初に生成する mackinawite よりも保護性の高く、Fe よりも化学量論的に S がリッチな greigite Fe₃S₄ と marcasite FeS₂ が検出されたことが特筆される。

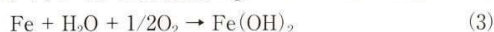
2.1 酸化過程—鉄の腐食初期段階—

鉄の腐食初期段階における酸化過程について考察する。

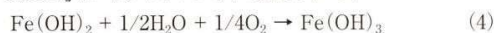
Fe 表面において、



(1) 式と (2) 式を加え、H₂O → H⁺ + OH⁻ を用いると、



Fe(OH)₂ は (4) 式のように酸化される。



Fe(OH)₃ は、Fe 表面上に沈殿する (溶解度積 2.64×10^{-39})。電解質中に溶存するリン酸イオン PO₄³⁻ は、そ

の大部分が Fe(OH)₃ と反応し (5) 式のように沈殿物として FePO₄ を生成する。FePO₄ は、 $\text{FePO}_4 \rightleftharpoons \text{Fe}^{3+} + \text{PO}_4^{3-}$ とわずかに溶解するが、溶解度積は 1.3×10^{-22} と小さい。

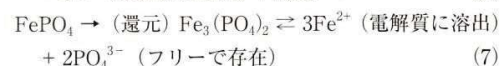
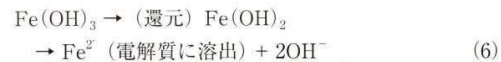


Fe(OH)₃ は FePO₄ より、かなり多い。

酸化過程—鉄の腐食初期段階—で、Fe 表面上に生成するのは (4) 式と (5) 式で、FePO₄ が沈殿した Fe(OH)₃ である。

2.2 還元過程

Fe(OH)₃ は Fe(OH)₂ に還元され、これが電解質に溶出し、Fe²⁺ を溶出する。



Fe₃(PO₄)₂ は、中性で溶解度が低い。(6) 式及び (7) 式が示すように、電解質中に溶出する Fe²⁺ が生成する嫌気性段階にあるので、電解質中では SRB が活動し、SO₄²⁻ が S²⁻ に還元される。すでに電解質中には Fe²⁺ が存在するので、バルクの電解質中で Fe²⁺ と S²⁻ は結合し、難溶性の FeS (溶解度積 1.59×10^{-19}) を形成する。十分な FeS が Fe 上に生成しないので、Fe の腐食は抑制されないで、Fe の嫌気性腐食が進行する。(7) 式で生成した PO₄³⁻ はフリーに存在し、後述するように港湾・海洋汚染を誘起しうる。

3. FeS 皮膜欠陥部における腐食の開始

Little らによると、mackinawite は最初に Fe 上に形成される結晶質の硫化物であると報告している⁷⁾。また、Videla は、SRB 存在下で最初に Fe 上に形成される鉄硫化物は、通常、FeS_(1-x) と表わされる Fe に対して S 欠乏の硫化物で、十分でない保護性の mackinawite であることが一般の一致として受け入れられていることを示して

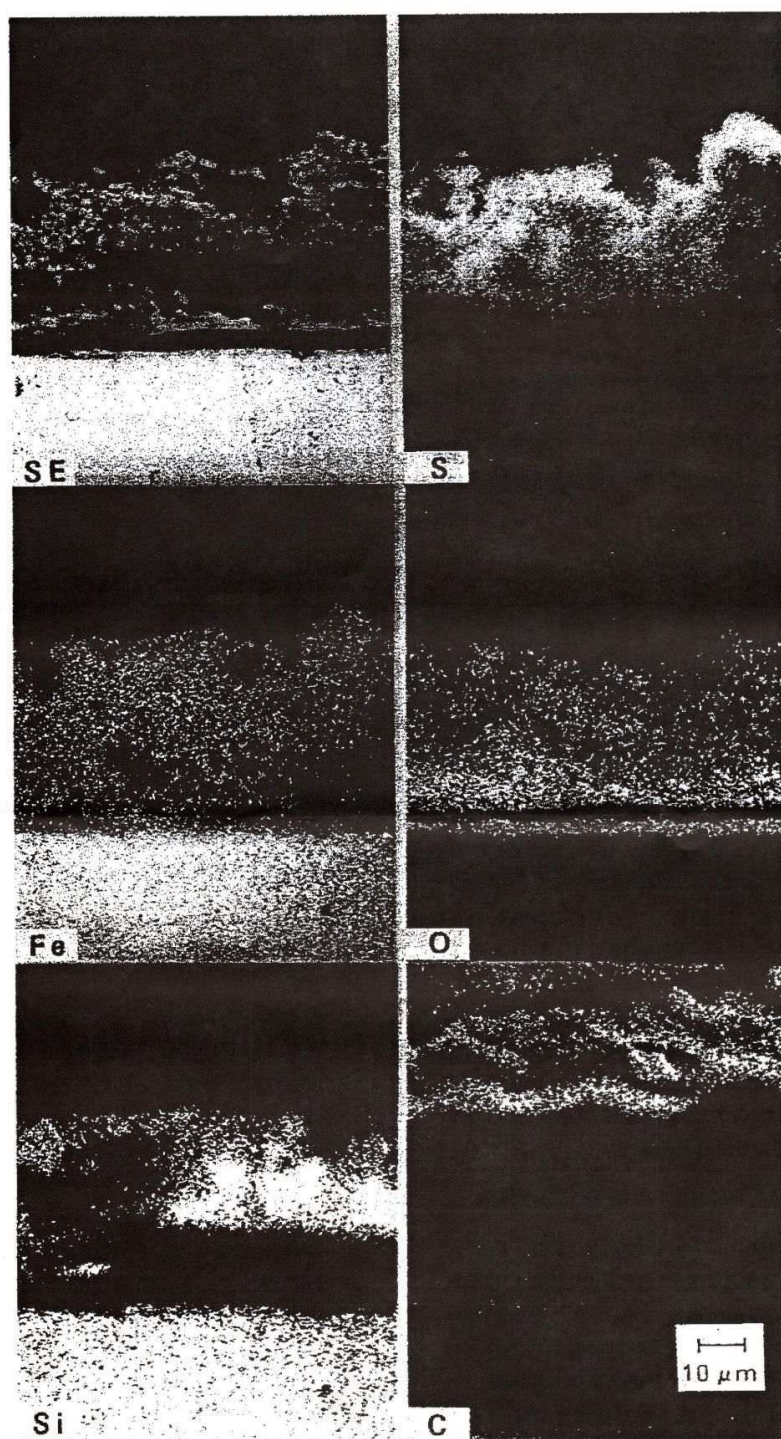


図1 実験室試験後のダクタイル鋳鉄クーボンのFe表面上の元素分布⁴⁾
 (試験後の pH 8.4、Eh $-0.282 \text{ V}_{\text{SHE}}$ 、SRB 生菌数 $> 2 \times 10^6 / \text{g-soil}$)

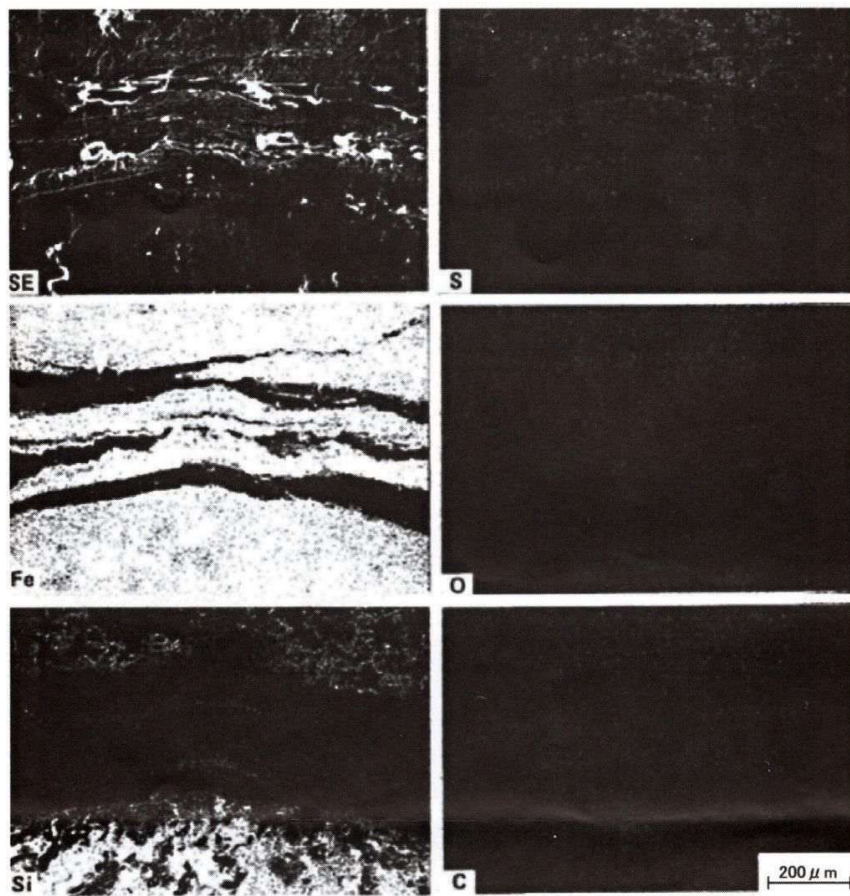


図2 フィールド調査したダクタイル鉄管のFe表面上の元素分布⁵⁾
(掘削時の管周り土壌の pH 6.00、Eh -0.001 V_{SHE}、SRB 生菌数 1×10^4 /g-soil)

いる^{8),9)}。本稿で記述したFeS皮膜欠陥部での腐食の開始は、mackinawiteのように保護性の不十分な皮膜で発生することが考えられる。2. で述べたFe上のFeS皮膜は、生成量が少なく十分な保護性機能を有しないmackinawiteであることが考えられる。

4. フリーの PO_4^{3-} に起因する港湾・海洋汚染

FePO_4 が還元されて、 $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$ になり、 Fe^{2+} と PO_4^{3-} を電解質に溶出する。 Fe^{2+} はSRBによって生成した S^{2-} と結合してFeSが生成するが、 PO_4^{3-} は電解質中でフリーとなる。フリーの PO_4^{3-} が電解質中に溶出しリンの富栄養化現象が起こると、赤潮の発生、植物性プランクトンの繁殖により、港湾・海洋汚染が誘起されうる。上記は、汽水湖でみられる。

5. まとめ

- 1) 微生物学的還元過程は、段階的に進行する。なかでも Fe^{3+} が Fe^{2+} に還元されて、 Fe^{2+} が溶出した還元

段階でSRBが SO_4^{2-} を S^{2-} に還元し、電解質中で Fe^{2+} が豊富な場合、硫化物として難溶性のFeSが形成されることが、Feの嫌気性腐食に大きな影響を及ぼす。

- 2) SRBとリン酸イオンが存在する鉄の初期の酸化過程において、アノード・カソード反応により $\text{Fe}(\text{OH})_3$ と、これに反応する FePO_4 が沈殿する。続く還元過程段階において、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ が還元されて Fe^{2+} と OH^- が、また FePO_4 が還元されて Fe^{2+} と PO_4^{3-} が溶出する。電解質中に溶出する Fe^{2+} が生成する嫌気性段階にあるので、SRBが活動し SO_4^{2-} が S^{2-} に還元される。すでに電解質中には Fe^{2+} が存在するので、バルクの電解質中で Fe^{2+} と S^{2-} は結合し、難溶性のFeSを生成する。保護性の硫化物皮膜であるFeSがFe表面上に生成されないで、Feの嫌気性腐食は進行する。フリーの PO_4^{3-} が $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$ から溶出し、硫酸塩還元にとまってリン酸が溶出する。 PO_4^{3-} は、港湾・海洋汚染の問題を誘起しうる。

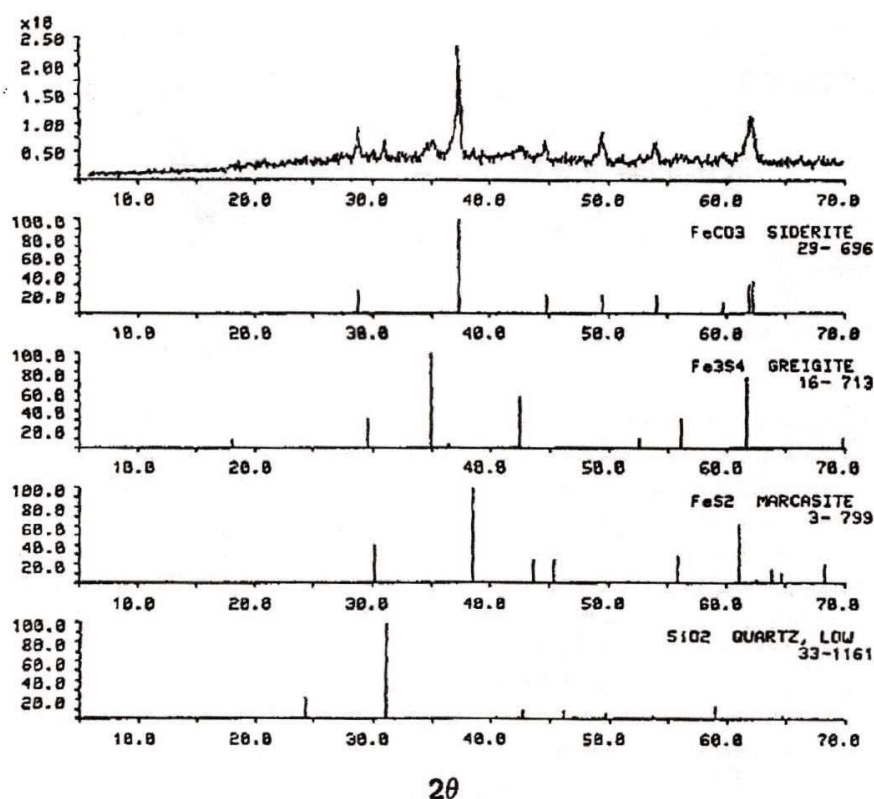


図3 フィールド調査したダクタイル鉄管のFe表面上の生成物のX線回折結果⁵⁾

参考文献

- 1) W. P. Iverson, "Corrosion of Iron and Formation of Iron Phosphide by *Desulfovibrio desulfuricans*", *Nature*, 217, p.1265 ~ 1267 (1968).
- 2) W. P. Iverson, G. J. Olson, L. F. Heverly, "The Role of Phosphorus and Hydrogen Sulfide in the Anaerobic Corrosion of Iron and the Possible Detection of This Corrosion by an Electrochemical Noise Technique", *Proceedings of the International Conference on Biologically Induced Corrosion*, p.154 ~ 161, National Association of Corrosion Engineers (1986).
- 3) 土壌微生物研究会, "土と微生物", 岩波書店 (1968).
- 4) K. Kasahara, F. Kajiyama, "Role of Sulfate Reducing Bacteria in the Localized Corrosion of Buried Pipes", *Proceedings of the International Conference on Biologically Induced Corrosion*, p.171 ~ 183, National Association of Corrosion Engineers (1986).
- 5) 梶山文夫, "電気化学的手法を用いた鉄管の土壌腐食に関する研究", 東京工業大学博士学位論文 (1989).
- 6) J. R. Postgate, "The Sulphate-reducing Bacteria", Cambridge University Press (1979).
- 7) B. J. Little, J. S. Lee, R. I. Ray, "Diagnosing Microbiologically Influenced Corrosion: A State-of-the-Art Review", *Corrosion*, 62, No.11, p.1006 ~ 1017 (2006).
- 8) H. A. Videla, "Corrosion of Mild Steel Induced by Sulfate Reducing Bacteria — A Study of Passivity Breakdown by Biogenic Sulphides", *Proceedings of the International Conference on Biologically Induced Corrosion*, p.162 ~ 170, National Association of Corrosion Engineers (1986).
- 9) R. A. King, J. D. A. Miller, J. S. Smith, "Corrosion of Mild Steel by Iron Sulphides", *British Corrosion Journal*, 8, p.137 ~ 141 (1973).

受理日: 令和6年7月26日

電食防止研究委員会 第157回 定例委員会議事録 (1/1) (案)

開催日時 令和7年7月23日(水) 13:30~14:50

開催場所 電気学会会議室及びzoom

東京都千代田区五番町6-2

1. 出席者

21名。(添付参加者名簿参照)

2. 議事概要

2.1 前回議事録承認(配布資料あり)

第156回定例委員会議事録(案)が報告され1点の修正をもって承認された。

2.2 定-616 酸性硫酸塩土壌の究明(配布資料あり)

定-617 *Thiobacillus*属による可酸化性硫黄化合物の酸化でもたらされる土壌の酸性化と鋼及び鉄の腐食防食(配布資料あり)

定-618 潜在的酸性硫酸塩土壌かつ有機質土壌の特性を有する土壌に対する鉄パイプラインの腐食(配布資料あり)

上記3件について梶山顧問より報告がされた。

大地や丘陵地での大規模土木工事が進展する中で、掘削などにより地表に露出した盛土地盤(海成粘土)の酸化は硫酸を生成し、鋼製インフラに悪影響を及ぼす。これは、土中に含まれるパイライト FeS_2 が空気にさらされ酸化反応を起こすためである。今回の資料ではこの原理などを細かく述べている。

2.3 定-619 ロボット技術を活用した高所重作業の生産性、安全性向上(配布資料あり)

ロボット技術を活用した高所重作業の生産性、安全性向上についてJR西日本の吉田委員より紹介がされた。

今回紹介されたロボットはインフラメンテナンスにおける労働力不足の顕著化に伴い、持続的進化に向けたハード・ソフトの機能向上を目的としている。また、作業対象としては6m以上の高所作業で比較的軽重量の部材を取り扱う作業とし、伐採作業や塗装作業について実用試験を開始している。

2.5 その他、事務局連絡

特になし

【次回開催案内】第158回 定例委員会

開催日時: 令和7年 9月17日(水) 13:30~

開催場所: 電気学会会議室及び zoom

電食防止研究委員会 第157回 定例委員会 出席者名簿

令和7年7月23日（水）

	役職	氏名	所属団体・企業	出欠	代理出席者・同行者 所属・氏名
1	委員長	畠中 省三	JFEエンジニアリング(株) 導管事業部 導管技術部	○	
2	副委員長	小西 武史	公益財団法人 鉄道総合技術研究所 電力技術研究部 き電	○	
3	副委員長	深谷 朝之	日本防蝕工業(株) 東京支店 第二技術部	○	
4	会計 監事	中村 康朗	東京ガスネットワーク(株) 技術革新部 技術統括グループ	○	
5	会計 監事	山田 健太郎	関東鉄道協会 〔小田急電鉄(株)〕		
6	顧問	梶山 文夫	東京電蝕防止対策委員会	○	
7	幹事 (庶務)	竹葉 康之	(株)ナカポーテック 東京支店 地中・陸上担当部	○	
8	委員 (会計)	山野 剛	日本防蝕工業(株) 東京支店 第一技術部	○	
9	幹事 (企画)	品川 尚史	(株)ジェイアール総研電気システム 電力部		
10	幹事	土淵 孝浩	東京地下鉄(株) 電気部 電力課	○	
11	幹事	久野 泰史	(株)ナカポーテック 技術統括部 技術部	○	
12	委員	藤本 憲宏	NTT東日本技術協力センタ	○	
13	委員	三島 昭二 (代理：大阪ガス 西川様)	大阪ガスネットワーク(株) 総合保全部 保全マネジメントチーム 防食グループ	○	代) 西川様
14	委員	田中 裕	公益財団法人 鉄道総合技術研究所 鉄道国際規格センター		
15	委員	山川 唯人	東日本旅客鉄道(株) 電気ネットワーク部 保安・電路G	○	
16	委員	橋本 康功	東日本旅客鉄道(株) JR東日本研究開発センター テクニカルセンター		
17	委員	清水 歩	東海旅客鉄道(株) 総合技術本部 技術開発部	○	代) 栗木様
18	委員	吉田 修	西日本旅客鉄道(株) 電気部 電気課	○	
19	委員	生越 啓史 日沼 利栄	東京都交通局 事務局：車両電気部電力課		
20	委員	森 繁一	関西鉄道協会 〔阪神電気鉄道(株)〕	○ ○	金田様 北野様
21	委員	西尾 和晴	中部鉄道協会 事務局長 窓口 小塚 仁史	○	名古屋市交通局 安藤様
22	委員	前田 亮	一般社団法人 日本ガス協会 技術部		

敬称略 (1/2ページ)

電食防止研究委員会 第157回 定例委員会 出席者名簿

令和7年7月23日（水）

[illegible]

敬称略

(2/2ページ)

酸性硫酸塩土壌の究明

1. 丘陵地の宅地造成による地形改変

1960 年代後半から 1970 年代の宅地造成は、図 1 に示すように一つの尾根と谷、あるいはいくつかの尾根と谷に跨り、元の地形とはまったく異なる広大な人口の平坦面が作られるようになった。図 1 の点線は造成前の地表面を、盛土を含む実線は造成後の地表面をそれぞれ表わす。

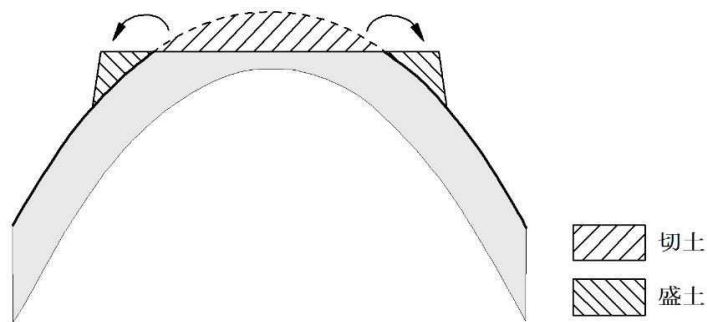


図 1 丘陵地の宅地造成による地形改変の地質断面

盛土地盤（海成粘土）の酸化は、硫酸を生成し、諸施設にさまざまな悪影響を及ぼす。大地や丘陵地での大規模土木工事が進展する中で掘削などにより地表に露出した結果、酸性化する土が発生している。これは、土に含まれるパイライト FeS_2 が空気にさらされ酸化反応を引き起こすためである。このような土は酸性硫酸土（酸性硫酸塩土壌）とよばれ、日本全国に分布している。

2. 酸性硫酸塩土壌

ここでは、土壌 $\text{pH} < 3.5$ を活性酸性硫酸塩土壌、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2) < 3.5$ を潜在的酸性硫酸塩土壌と称する。

3. 潜在的酸性硫酸塩土壌から活性酸性硫酸土壌への移行

図 2 は、潜在的酸性硫酸塩土壌から活性酸性硫酸土壌への移行を示したものである。

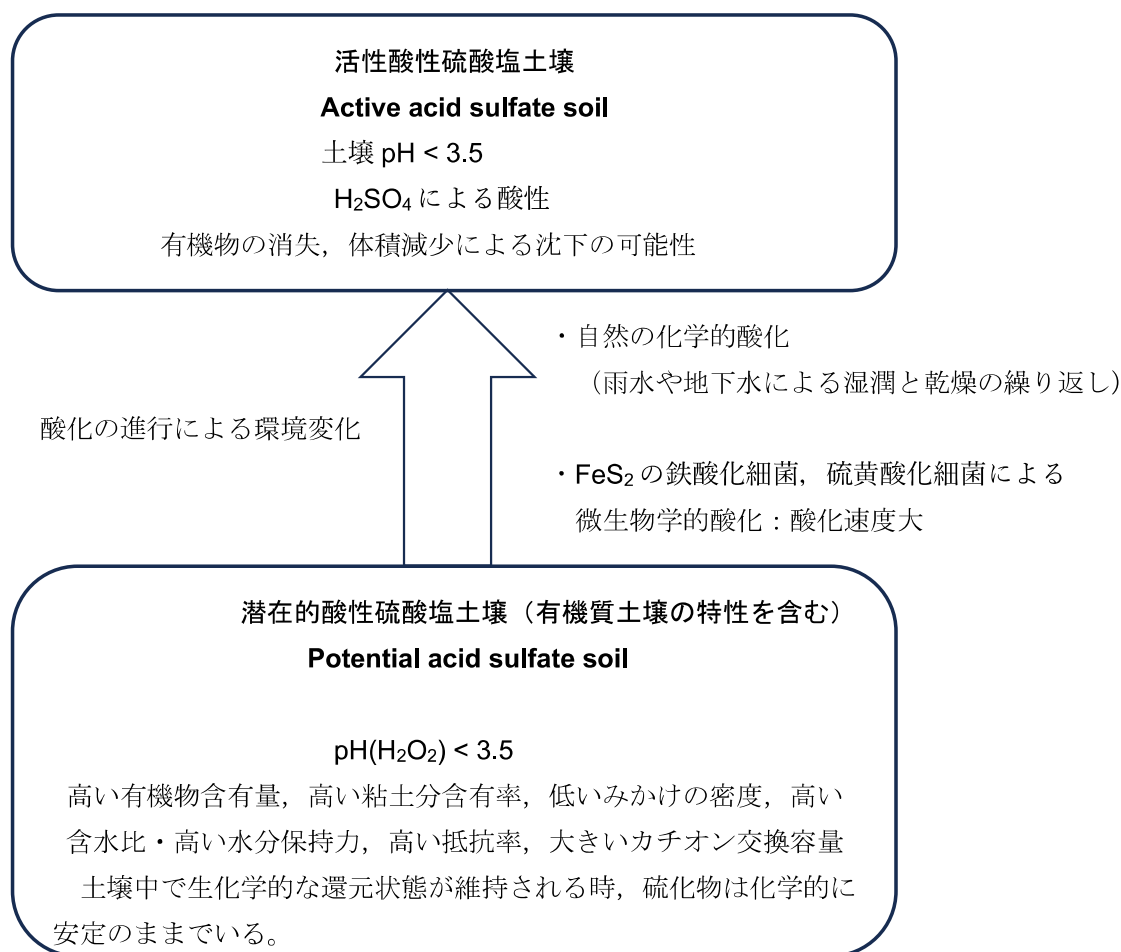


図 2 潜在的酸性硫酸塩土壌から活性酸性硫酸塩土壌への移行

梶山は、有機物含有量 (Organic matter content) と粘土分含有率 (Clay), みかけの密度 (SG), 含水比 (w_c) との関係が次式で表されることを明らかにした。

$$\text{Organic matter content (\%)} = 0.103 \text{ Clay} - 41.6 \text{ SG} + 0.0765 w_c + 102$$

ここで

Clay : 粘土分含有率 (%),

SG : みかけの密度 (Mg/m^3),

w_c : 含水比 (%)

<参考>

CEOCOR 2025 発表論文

18 –Ductile iron pipeline corrosion in soil having the properties of potential acid sulfate soil and organic soil

Fumio Kajiyama, Dr.

Formerly Tokyo Gas Network Co., Ltd., 1-5-20, Kaigan, Minato-ku, Tokyo 105-8527, Japan

Abstract

Severe external corrosion damage including perforation of bare ductile iron pipeline was observed in soil having the properties of potential acid sulfate soil and organic soil. This soil is defined as soil with $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)^* < 3.5$, organic matter content $\geq 20\%$ and percentage of clay $\geq 40\%$, that is characterized by high organic matter content, high percentage of clay, low apparent specific gravity, high water content leading to high water-holding capacity and high cation exchange capacity. It should be noted that severe corrosion-causing soil contained small amounts of soluble salts, which resulted in high resistivities above 30 ohm m. This paper presents ductile iron pipeline corrosion in soil having the properties of potential acid sulfate soil and organic soil.

*pH value after forced oxidation of a soil by hydrogen peroxide

Key words: ductile iron pipeline corrosion, acid sulfate soil, organic soil

テクニカルレポート

Thiobacillus 属による可酸化性硫黄化合物の酸化でもたらされる 土壌の酸性化と鋼及び鋳鉄の腐食防食

梶 山 文 夫*

Fumio KAJIYAMA

宅地造成により地中にあった可酸化性硫黄化合物を含有する嫌気性土壌が地表に露出するようになると、嫌気性土壌は空気による乾燥・酸化と雨水 ($O_2 + H_2O$) の作用及び鉄酸化細菌と硫黄酸化細菌の作用を受け硫酸が生成し酸性を呈する。いわゆる酸性硫酸塩土壌になることがある。ここでは、可酸化性硫黄化合物としてパイライト (黄鉄鉱) FeS_2 を取り上げた。酸性硫酸塩土壌に水道やガスのパイプラインが埋設された状況になると、時としてこれらのパイプラインに対して速い速度の腐食が起こりうる。本稿は、既往の研究成果をレビュー、著者によるフィールド調査結果を解析し、微生物学見地から酸性硫酸塩土壌はどのような反応で生成されるのか、酸性硫酸塩土壌に鉄と鋼が埋設された場合の腐食防食について述べることにする。なお、土壌環境は常温・常圧とした。

キーワード：可酸化性硫黄化合物、パイライト、硫酸塩還元菌、*Thiobacillus* 属、鉄酸化細菌、硫黄酸化細菌、硫酸塩還元菌、共存、酸性硫酸塩土壌、鉄及び鋼、腐食、防食

1. はじめに

宅地造成により地中にあった可酸化性硫黄化合物 (oxidizable) を含有する嫌気性土壌が地表に露出するようになると、嫌気性土壌は空気による乾燥・酸化と雨水 ($O_2 + H_2O$) の作用及び O_2 存在下での鉄酸化細菌 (iron-oxidizing bacteria, IOB) と硫黄酸化細菌 (sulfur-oxidizing bacteria, SOB) の作用を受け硫酸が生成し酸性を呈する酸性硫酸塩土壌 (acid sulfate soil) になることが明らかになっている。酸性硫酸塩土壌は、可酸化性硫黄化合物により、例えば $pH \leq 3.5$ の極めて強い酸性を呈する土壌であるといえることができる。なお、ここでは可酸化性硫黄化合物として硫化鉄と元素状硫黄が結合したパイライト (pyrite、黄鉄鉱) FeS_2 を取り上げた。これは、海底堆積物中の還元型硫黄化合物で、パイライト態硫黄が全硫黄の 95 % 以上を占めるのが一般であり、元素状硫黄、有機態硫黄なども少量存在するが、 FeS 態硫黄は極めて少量しか存在しない。パイライトの蓄積量は乾燥堆積物重量あたり 1 ~ 4 % 程度が普通であり、まれに 5 % 以上にも達するという報告による¹⁾。

酸性硫酸塩土壌に水道やガスのパイプラインが埋設された状況になると、時としてこれらのパイプラインに対して速い速度の腐食が起こりうる。本稿は、既往の研究成果をレビュー、著者によるフィールド調査結果を解析し、微生物学見地から酸性硫酸塩土壌はどのような反応で生成されるのか、酸性硫酸塩土壌に鉄と鋼が埋設された場合の腐食防食について述べることにする。なお、土壌環境は常温・常圧とした。

2. 対象とする微生物とその活動

本稿で対象とする微生物は、地中の嫌気的環境にあった嫌気性微生物とこの土壌が地表に露出後の好気性環境になった場合の好気性微生物を考慮する必要がある。

2.1 硫酸塩還元菌 (sulfate-reducing bacteria)

硫酸塩還元菌 (SRB) は、 pH 5.5 ~ 8.5 の嫌気性環境で育つ独立栄養的従属栄養微生物である。硫酸塩還元菌は水素 (例 *Desulfovibrio Desulfuricans*) を利用する又は有機酸 (例 乳酸) を酸化することによって エネルギーを得る。この微生物は、チトクローム C3 を通して^{2),3)} 硫酸塩の硫化物への還元と結びついて、ヒドロゲナーゼ

* 電食防止研究委員会 (〒 262-0025 千葉県千葉市花見川区花園 2-8-12) 工学博士

Study committee of stray-current corrosion control (2-8-12, Hanazono, Hanamigawa-ku, Chiba, 262-0025, Japan) Dr. Eng.

酵素によって水素を利用又は脱水素酵素によって有機酸を酸化する。

2.2 鉄酸化細菌 (iron-oxidizing bacteria)

鉄酸化細菌 (IOB) は、溶解している Fe^{2+} を Fe^{3+} に酸化することによりエネルギーを得る化学独立栄養細菌である。 H_2SO_4 が存在する好気性環境で生息し、最適 pH は 2.0 ~ 2.5 である⁴⁾。IOB は Fe^{2+} と S^{2-} を含有するパイライト鉱石中と酸性土壌の廃水の近くに分布し生きている。属名は *Thiobacillus ferrooxidans* である。

2.3 硫黄酸化細菌 (sulfur-oxidizing bacteria)

硫黄酸化細菌 (SOB) は化学独立栄養細菌であり、元素硫黄、チオ硫酸や硫化物など還元型無機硫黄化合物をエネルギー源として利用し、これらを酸化することによるエネルギーを得て二酸化炭素を同化し、好気性の無機的环境で生育する。その結果、硫酸を生成する。主な反応式は、 $\text{S}^0 + 3/2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}^+$ である。*Thiobacillus* 属の菌種として、*T. thiooxidans*, *T. ferrooxidans*, *T. organoparus*, *T. acidophilus* *T. kabobis* の 5 菌種は耐酸性の菌で、特に *T. thiooxidans* は耐酸性が強く、生育可能範囲の pH は 0.5 ~ 5.5 である⁵⁾。生成された硫酸は、環境を非常に pH の低い酸性にする。SOB はチオ硫酸塩や硫化物等の還元型無機硫黄化合物も利用する。硫黄酸化細菌の主な属は *Thiobacillus* 及び *Sulfolobus* の 2 属である。嫌気性から好気性への環境変化がある場合、SOB は鉄酸化細菌 (IOB) と硫酸塩還元菌 (SRB) と密接な関係にある。

これまで細菌分類において、菌種の統合、整理が行われてきた。*T. thiooxidans*, *T. ferrooxidans*, *T. organoparus*, *T. Acidophilus* 及び *T. kabobis* の 5 菌種は耐酸性の菌として *Thiobacillus* 属に分類されている。

注意：

pH 6 ~ 7 で生息し Fe^{2+} を酸化して水酸化鉄を生成する、従属栄養細菌である鉄細菌が古くから知られている。鉄細菌 (iron bacteria) には、*Gallionella* と *Leptothrix* の 2 属がよく観察されている。鉄細菌は鑄鉄製の水道管の内面に錆瘤を生成し、通水障害を起こしたことが多く報告されている⁶⁾。鉄細菌は鉄酸化細菌と細菌名が非常に似ているので、注意が必要である。いまでも有名な海外、国内図書を問わず、鉄細菌と鉄酸化細菌 (iron bacteria と iron-oxidizing bacteria) を混同した執筆がしばしばみられる。鉄細菌によるダクタイル鉄管の腐食とそのメカニズムについては、梶山の報告がある⁷⁾。

3. FeS_2 の酸化

ここでは、地表に露出する前に地下に存在した土壌は、粘土質の泥炭土、海底堆積土が多い。これらの土壌は、SRB の活動によりパイライト FeS_2 を含んでいる。 FeS_2 は結晶系が等軸晶系で一般には六面体の結晶であ

り、非晶質の FeS と S が反応して生成する。既述したように海底堆積物中の還元型硫黄化合物中のパイライト態硫黄が全体の 95 % 以上を占めることから、主要な可酸化性硫黄である硫化物は FeS_2 とみなすことができる。 FeS_2 を含む土壌が地表に露出すると、これが酸化されることになる。 FeS_2 の酸化時間は、長い年月を経て海底堆積物が隆起し、地表での風化を受けた場合と、土木工事の宅地造成や道路建設等により比較的短い期間地表での酸化を受けた場合と、かなりの差がある。ここでは FeS_2 が土木工事の宅地造成により地表で酸化する場合を対象とし、後述する表 1 と表 2 の 2 ケースを取り上げた⁸⁾。

地中の土壌が地表に露出した初期段階は、 FeS_2 の酸化の初期段階ということができる。微生物活動が FeS_2 に関与した場合の特徴はその時の微生物的酸化反応速度が、自然条件下での自発的な化学酸化反応速度よりもオーダーのレベルで大きいということである。

表 1 は、 FeS_2 の化学的酸化反応で生成した $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ が FeS_2 を化学的に酸化すると同時に IOB の基質 FeSO_4 を生成するケースを示したものである。

表 1 より、以下のことが考察される。

- 1) 宅地開発により地中にあった嫌気性土壌が地表に露出するようになると、表 1 に示すように酸化反応初期は FeS_2 が空気中の酸素によって酸化される (b) 式により $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ と H_2SO_4 が生じる。 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ は酸化剤として FeS_2 を酸化させる。 H_2SO_4 により 4 章で詳述する (潜在的) 酸性硫酸塩土壌が生成され、硫酸酸性環境が醸成される。
- 2) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ によって FeS_2 が酸化された結果、 FeSO_4 と S^0 が生じる ((c) 式)。
- 3) FeSO_4 は H_2SO_4 の存在下で鉄酸化細菌 (IOB) の基質であり、 Fe^{2+} の酸化反応が起こる ((d) 式)。(d) 式で生成する $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ は残余 FeS_2 が存在していれば再び FeS_2 の酸化剤として (c) 式のように働き、かつ IOB の基質を提供する。残余 FeS_2 が存在しなければ、ダクタイル鉄管の腐食を発生させる。
- 4) (c) 式で生成した元素硫黄 S^0 は SOB により (e) 式により H_2SO_4 が生じる。
- 5) 表 1 の (b)、(c)、(d) 及び (e) 式を統合すると、 $6\text{FeS}_2 + 22.5\text{O}_2 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 3\text{H}_2\text{SO}_4$ となり、酸性土壌の酸化が進行するのに伴い、 FeS_2 の酸化反応初期段階において、 H_2SO_4 の生成により酸性土壌の pH は低下する。ただし、以下を仮定している。
 - i) (b) 式で生成した $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ がすべての FeS_2 を酸化する ((c) 式)。
 - ii) (c) 式で生成した FeSO_4 がすべて IOB のエネルギー源となって消費される ((d) 式)。

表1 FeS₂の化学的酸化反応で生成したFe₂(SO₄)₃がFeS₂を化学的に酸化すると同時にIOBの基質FeSO₄を生成するケース

FeS + S → FeS ₂	・ バイライトFeS ₂ の生成	(a)
4FeS ₂ + 15O ₂ + 2H ₂ O → 2Fe ₂ (SO ₄) ₃ + 2H ₂ SO ₄	・ 自然条件下でのFeS ₂ の化学的酸化反応 ・ Fe ₂ (SO ₄) ₃ とH ₂ SO ₄ の生成、(顕在的) 酸性硫酸塩土壌の生成	(b)
FeS ₂ + Fe ₂ (SO ₄) ₃ → 3FeSO ₄ + 2S ⁰	・ Fe ₂ (SO ₄) ₃ によるFeS ₂ の酸化 ・ FeS ₂ は酸に溶解しにくいので、FeS ₂ とH ₂ SO ₄ は反応しない ・ IOBの基質FeSO ₄ の生成	(c)
IOB 4FeSO ₄ + 2H ₂ SO ₄ + O ₂ → 2Fe ₂ (SO ₄) ₃ + 2H ₂ O	・ IOBによるFe ²⁺ の酸化反応 ・ Fe ₂ (SO ₄) ₃ による残余FeS ₂ の酸化、 ・ (c) 式へ	(d)
SOB S ⁰ + 3/2O ₂ + H ₂ O → H ₂ SO ₄	・ SOBによるH ₂ SO ₄ の生成	(e)
Fe ₂ (SO ₄) ₃ + 6H ₂ O → 2Fe(OH) ₃ + 3H ₂ SO ₄	・ pH > 3、生成された酸の溶脱や、天然あるいは人為による中和の進行、Fe ₂ (SO ₄) ₃ の化学的加水分解反応	(f)
3Fe(OH) ₂ ⁺ + 2SO ₄ ²⁻ + K ⁺ → KFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆ Fe(OH) ₂ ⁺ : 酸化されたFe ³⁺ が部分的加水分解反応を受けて生成	・ pH 4程度までの中度の酸性条件下、ジャロサイト (jarosite) KFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆ の生成	(g)
KFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆ + H ₂ O → 3FeOOH + KOH + 2H ₂ SO ₄	・ pH > 4、ジャロサイトの化学的加水分解反応、ゲーサイト (goethite) FeOOHの生成	(h)

→ 化学反応

→ *Thiobacillus ferrooxidans* と *Thiobacillus thiooxidans* (特に耐酸性が強い) を含む *Thiobacillus* 属による微生物反応

- iii) (c) 式で生成したS⁰がすべてSOBのエネルギー源となって消費される ((e) 式)。
- 6) 生成された酸の溶脱や、天然あるいは人為による中和の進行により pH > 3 になると (f) 式のように Fe₂(SO₄)₃ の化学的加水分解反応が起こる。
- 7) 酸化された Fe³⁺ が部分的加水分解反応を受けて生成した Fe(OH)₂⁺ から (g) 式によりジャロサイト (jarosite) KFe₃(SO₄)₂(OH)₆ が生成する。ジャロサイトは、ストロー・イエロー (straw-yellow) と称される。斑紋として土壌中に存在する特徴的な色により、フィールドで酸性硫酸塩土壌を判別することができる。
- 8) pH > 4 になるとジャロサイトの化学的加水分解反応が起こり、ゲーサイト (goethite) FeOOH が生成する。pH を低くする方向に働くが、残存する少量の吸着態 SO₄²⁻ や Al(OH)SO₄ 等が湛水、排水の繰り返しで、徐々に脱着又は加水分解されて排水中に失われる。
- 9) 都市部のように土壌露出後、道路が舗装されると時間とともに地表面下の土壌の酸化は進まない状況になる。

表2は、FeS₂の化学的酸化反応で生成した FeSO₄ が続く IOB の微生物反応生成物 Fe₂(SO₄)₃ により FeS₂ を化学的に酸化するケースを示したものである。

(d) 式において、残存している FeS₂ がなければ (c) 式で生成した Fe₂(SO₄)₃ は (f) 式のように加水分解反応が起きる。

ジャロサイト及びゲーサイトも表1と同様生成するものと考えられる。

SOBにより (E) 式に従って H₂SO₄ が生成すると pH はさらに低下する。

4. 最終的な pH の上昇安定化

FeS₂の酸化によって生成した大量の H₂SO₄ のうちの多くは、経時的に雨水、雪解け水などから下方への浸透、湛水水とともに徐々に失われていくと考えられる。残りは土壌中の塩基性硫酸アルミニウム等の塩基性物質と反応して中和される。最後に残る Al(OH)SO₄ など湛水、排水の繰り返しで徐々に吸着や加水分解されて排水中に失われる。酸性硫酸塩中硫化物がすべて酸化され、生成した酸がすべて排水中に失われた時の状態を考える。この状態は、炭酸のみによって酸性を呈する土壌

表2 FeS₂の化学的酸化反応で生成したFeSO₄が続くIOBの微生物反応生成物Fe₂(SO₄)₃によりFeS₂を化学的に酸化するケース

FeS + S → FeS ₂	・ バイライトFeS ₂ の生成	(a)
2FeS ₂ + 7O ₂ + 2H ₂ O → 2FeSO ₄ + 2H ₂ SO ₄	・ 自然条件下でのFeS ₂ の化学的酸化反応	(B)
	・ FeSO ₄ とH ₂ SO ₄ の生成、(顕在的)酸性硫酸塩土壌の生成	
IOB 2FeSO ₄ + H ₂ SO ₄ + 1/2O ₂ → Fe ₂ (SO ₄) ₃ + H ₂ O	・ H ₂ SO ₄ 存在下でのIOBによるFeSO ₄ の酸化、Fe ₂ (SO ₄) ₃ の生成	(C)
FeS ₂ + 7Fe ₂ (SO ₄) ₃ + 8H ₂ O → 15FeSO ₄ + 8H ₂ SO ₄	・ Fe ₂ (SO ₄) ₃ によるFeS ₂ の酸化	(D)
	・ FeS ₂ は酸に溶解しにくいので、FeS ₂ とH ₂ SO ₄ は反応しない	
	・ IOBの基質FeSO ₄ の生成、(c) 式へ	
	・ Sの酸化数は、FeS ₂ の-1からFeSO ₄ 及びH ₂ SO ₄ の+6に増加し、FeS ₂ の酸化を裏づけ	
SOB 2H ⁺ + S ²⁻ + 2O ₂ → H ₂ SO ₄	・ SOBによるFeS中のS ²⁻ の酸化	(E)

→ 化学反応

→ *Thiobacillus ferrooxidans* と *Thiobacillus thiooxidans* (特に耐酸性が強い) を含む *Thiobacillus* 属による微生物反応

となる最終的な pH の上昇安定化状態といえる。いま $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$ の反応の平衡定数 ($[\text{HCO}_3^-] \cdot [\text{H}^+] / [\text{CO}_2] = 4.16 \times 10^{-7}$) は 4.16×10^{-7} 、CO₂の水に対する溶解度は Henry の法則に従い、その定数は $0.0290 \text{ mole} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{atm}^{-1}$ であるとする。すると CO₂分圧 10^{-1} で pH 4.46、CO₂分圧 10^{-2} で pH 4.96 となる。よって、最終的に pH の上昇が安定化した時の pH は、4.5 から 5.0 (CO₂分圧 10^{-1} から 10^{-2}) の範囲で安定化するものと考えられる。しかしながら、pH 4.5 - 5.0 は、極めて強酸性から強酸性に分類されるので、酸性硫酸塩土壌地帯をさらに改良するためには、地形、気象等を十分考慮した灌漑や排水工事により良質な灌漑水で酸や塩基性硫酸塩を洗浄する必要がある。

5. 酸性硫酸塩土壌とその分布

これまで述べてきたように酸性硫酸塩土壌は、パイライトの酸化によって生成した硫酸により直接的又は間接的に誘起された pH が 4 より低い土壌である。酸性硫酸塩土壌は、世界を通して国々の海岸平野にまばらに出現する⁹⁾。酸性硫酸塩土壌は、地球の至る所で見出される。地球の寒冷地方 (フィンランドとスウェーデン)、温帯地方 (オーストラリア、中国)、熱帯地方 (東南アジア、アフリカ) である。世界で約 1200 万 - 1400 万 ha の酸性硫酸塩土壌があるとされている。そのうち約 750 万 ha が主に東南アジアの熱帯で見出されている。土壌がマレーシア半島の西海岸州において、土地が農業及び他の開発のために 1930 年代以来見出されている。土壌は、タイのバンコク平野の中、ベトナムのメコンデルタ、インドネシア、フィリピン、マレーシアと広範囲に

及ぶ。さらにタイに 80 万 ha、ベトナムに約 50 万 ha の酸性硫酸塩土壌がある。ミャンマーにおいて、いくつかの酸性硫酸塩土壌がエーヤワディー川の両岸の 2 つの場所で見出されている。インドネシアの西カリマンタンのカリマンタンパラトにおいて、酸性硫酸塩土壌が米の耕作のために長い間用いられている。これらの土壌への有機物の添加が栄養作用と苗の成長を改善することがわかっている。

わが国では、例えば酸性硫酸塩土壌である大阪層群の海成粘土では pH 2.4 - 4.3 と極めて強酸性であったが、地表に出ていなかった沖積層粘土や大阪湾底泥の pH は、8.1 あるいは 8.0 の強アルカリ性であることが報告されている。露頭で採取した海成粘土には H₂SO₄ が生成していたことが明らかになっている¹⁰⁾。

6. フィールド調査¹¹⁾

フィールド調査は、呼び径 200 mm、管厚 10.0 mm の低圧天然ガスタイル鉄管で、埋設年数は 17 年であった。土質は粘土からローム質で抵抗率は 11.20 から 404 Ωm、平均は 55.01 Ωm であった。ダクタイル鉄管は裸で土壌と直接接触过していた。そこで、このダクタイル鉄管は土壌の腐食性の影響を強く受けて腐食することになる。しかしながら、ダクタイル鉄管が裸であるので、異種土壌マクロセル等の形成により腐食する可能性がある。60 m に亘る裸のダクタイル鉄管に対して X m ± 0.5 m (X = 0, 1, 2, ... 60 の計測した腐食深さのうち最大腐食深さを抽出し、最大腐食速度を求めた。ただし、0 m と 60 m 地点は 0.5 m の片側のみの計測範囲であった。1 m 間隔で土壌特性値、微生物の生菌数の計数を行った。

6.1 ダクトイル鉄管に沿った最大腐食速度

図1は、ダクトイル鉄管に沿って1 m 間隔で得られた最大腐食速度を示したものである。最大腐食速度は36 m 地点の $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ 3.82、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ 3.20 の潜在的酸性土壌で0.405 mm/yであり、鉄酸化細菌の生菌数が 1×10^5 cell/g の大きな値を示したが、硫黄酸化細菌の生息は確認されなかった。以上の計測値は、現在活動的な腐食が起こっていたことを示す。0.3 mm/y よりも高い最大腐食速度は、隣接する35 – 45 m 区間でみられた。鉄酸化細菌は土壌のすべてのサンプルでみられなかった。

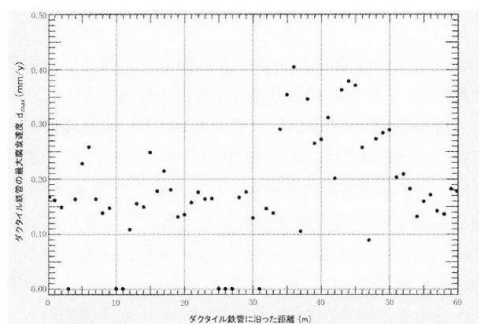


図1 1 m間隔で得られたダクトイル鉄管の最大腐食速度

6.2 ダクトイル鉄管に沿った土壌 pH

図2は、管が露出後、ダクトイル鉄管に沿って1 m 間隔で計測した土壌 pH を示したものである。ここで、pH は土壌水の $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ である。pH は3.73 から6.87 の範囲にあり、平均値は5.03であった。吉田は、pH が4.9 以下は「きわめて強酸性」、pH が5.0 から5.4 は「強酸性」と評価している。総数61のうちpH が5.4 以下の値を示したのは42点で（最小値3.73、最大値5.35、平均値4.58）68.9 %であった。それゆえ吉田の評価¹²⁾に基づく60 m のスパンは大まかに強酸性の土壌といえる。pH が3.5 以下の酸性硫酸塩土壌はみられなかった。

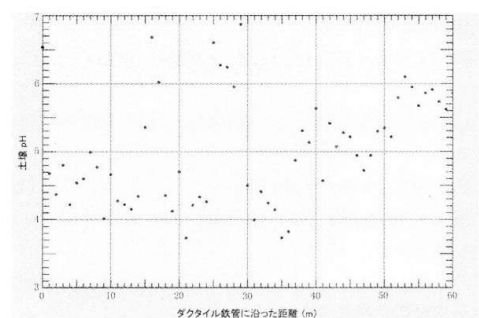


図2 ダクトイル鉄管に沿って1 m間隔で計測した土壌pH

6.3 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ と $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ との関係

図3は、土壌の $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ と $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ との関係を示したものである。図中の点線の $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ 3.5 以下の土壌は、酸化しないで土壌中に残存している可酸化性硫黄を H_2O_2 により強制的に酸化させた後のpHで潜在的酸性硫酸塩土壌を示す。両者の間には、相関係数0.747の正相関がみられた。 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ が低いほど $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ が低かった。 FeS_2 が酸化すると H_2SO_4 が生成し酸性を呈することから、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ 及び $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ が低いということは、 FeS_2 の酸化がかなり進行したとみなせると判断される。

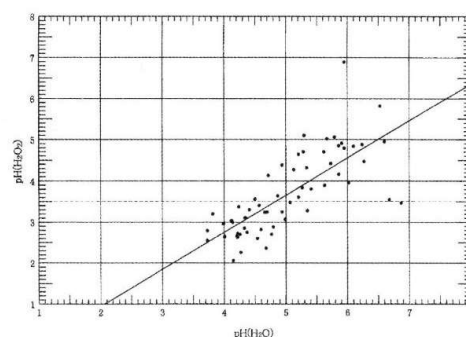


図3 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ と $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ との関係

6.4 FeS 濃度と $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ との関係

図4は、FeS 濃度と $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ との関係を示したものである。FeS 濃度は、HCl を用いた分析方法から FeS_2 を除く非晶質のFeS値であり、非晶質のFeSから FeS_2 ができるメカニズムは複雑である。FeS は H_2O_2 により強制的に酸化される。

表3は、図4で100 mass ppm よりも高いFeS 濃度かつ $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ が3.5 以下を示した4つの土壌の特性値を示したものである。表3より以下のことが明らかになった。表3で、微生物の生菌数は最確値法により求めた。

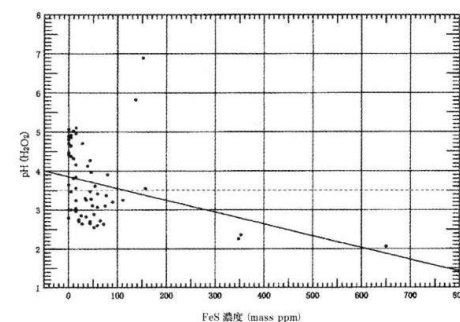


図4 FeS濃度と $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ との関係

表3 100 mass ppmよりも高いFeS濃度とpH(H₂O₂) が3.5より低い値を示した土壌の特性値

距離	最大腐食 速度	Eh	pH(H ₂ O)	pH(H ₂ O ₂)	FeS濃度	微生物の生菌数		
						SRB	IOB	SOB
m	mm/y	V _{NHE}			mass ppm	cell/g		
1	0.161	0.524	4.68	2.36	353	7×10	0	1×10 ²
11	0	0.609	4.27	2.26	348	1×10 ²	0	1×10 ³
13	0.155	0.504	4.15	2.06	650	1×10 ²	0	1×10
48	0.273	0.599	4.94	3.25	111	1×10 ²	00	4×10

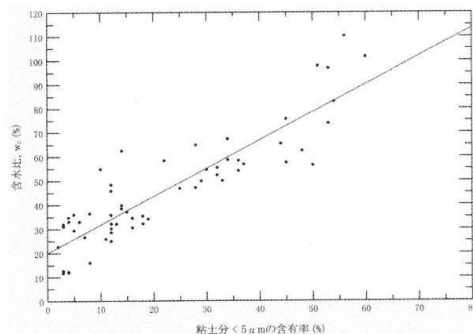
Eh：標準水素電極（NHE, Normal Hydrogen Electrode）電位基準

SRBの培養はPostgateのB寒天培地を、IOB及びSOBの培養は大阪発酵研究所推奨の液体培地をそれぞれ用いた¹³⁾。

- 1) 土壌は、pH(H₂O₂) が3.25以下の酸性で、潜在的酸性硫酸塩土壌であった。
- 2) 4つの土壌のIOB生菌数がゼロであったが、SRB及びSOBが共生していた。
- 3) FeS濃度の分析は、ZnとHClで分析試料の硫化物をH₂Sで追い出した後、H₂S吸収液にZnSとして固定し、比色計で670 nmにおける吸光度を計測してS²⁻濃度を求めた¹³⁾。よってFeS態Sを求めたものといえる。分析値のFeS濃度中にIOBが基質として利用できるFe²⁺は存在しないと判断される。IOBのエネルギー源であるFe²⁺が存在しないので、IOBは生育が停止したために生菌数がゼロであったといえる。
- 4) 100 mass ppmより高いFeS濃度は、生菌数7×10 cell/g以上のSRBによって生成した非晶質のFeSによるものである。

6.5 粘土分<5 μmの含有率と含水比W_cとの関係

図5は、粘土分<5 μmの含有率と含水比w_cとの関係を示したものである。両者との間には、相関係数0.888の高い正相関が得られた。粒径が2 μmより小

図5 粘土分<5 μmの含有率と含水比w_cとの関係

く帯電している場合、コロイドと称する。表4は、図5で粘土分<5 μmの含有率50 %以上の値を示した7つの土壌の特性値を示したものである。60 mの調査スパンのうち51 mから60 mまでの7つのすべての土壌のpH(H₂O₂) が3.5よりも高かったことから、51 mから60 mは非酸性硫酸塩土壌地帯といえることができる。IOBの生菌数は検出されなかった。SRBの生菌数は検出されたが、FeS濃度がND（検出されず）から54 mass ppmと低かったことから、SRBの活性はフィールド調査時点では低かったものと判断される。

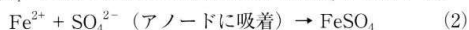
7. 酸性硫酸塩土壌中の鉄及び銅の腐食

Feの腐食はFe/土壌界面で起こる。腐食は、アノード反応とカソード反応から成る。フィールド調査で最大腐食速度0.405 mm/yを示したpH3.82の潜在的酸性硫酸塩土壌中の鉄及び銅の腐食の初期段階は以下のように考えられる。

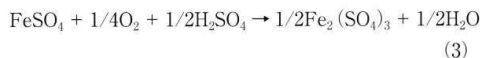
<アノード反応—鉄及び銅の腐食初期段階—>



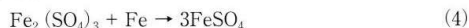
アノード反応生成物のFe²⁺はアノードに吸着しているSO₄²⁻と結合しIOBの基質であるFeSO₄が生成する。



IOBのエネルギー源であるFe²⁺が生成すると、既に土壌に存在するH₂SO₄の存在下で(3)式に示すIOBの微生物反応が進行する。

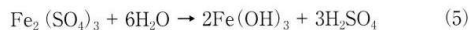


Fe₂(SO₄)₃は酸化剤として直接鉄及び銅を化学的に溶出する。



FeSO₄は再び消費され、(3)式と(4)式がサイクリックに進行する。

また、Fe₂(SO₄)₃は(5)式のように非生物学的な化学的加水分解反応を起こす。



(5)式より、Fe表面上には腐食反応を抑制する沈殿水酸

表4 粘土分 < 5 μmの含有率50 %以上の値を示した土壌の特性値

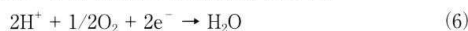
距離	最大腐食速度	Eh	pH(H ₂ O)	pH(H ₂ O ₂)	Fe ²⁺ 濃度	FeS濃度	SO ₄ ²⁻ 濃度	微生物の生菌数	
								SRB	IOB
m	mm/y	V _{NHE}			mass ppm	mass ppm	mass pm	cell/g	
51	0.203	399	5.21	3.61	13	54	870	1×10 ³	0
54	0.132	439	5.95	4.79	152	ND	369	3×10 ³	0
55	0.159	479	5.67	5.02	16	10	693	9×10 ²	0
57	0.142	519	5.91	4.91	10	5	624	4×10	0
58	0.136	509	5.73	4.42	7	ND	526	6×10	0
59	0.182	504	5.62	4.70	16	ND	625	2×10	0
60	0.178	519	5.86	4.85	3	5	444	2×10	0

ND：検出されず

化物 Fe(OH)₃ と、IOB が活動するのに必要な H₂SO₄ の存在環境を提供するが、Fe(OH)₃ が Fe 表面に対して遮蔽作用があるとアノード反応は抑制されることになる。

<カソード反応 一鉄及び鋼の腐食初期段階>

酸性と好気性環境であることから、(6) 式が起きると考えられる。pH3.82 では水素発生より酸素還元が優勢となる¹⁴⁾。溶存反応の消費反応が起こる。



時間の経過とともに、(3) 式と (6) 式によって O₂ が消費され Fe/ 土壌界面は嫌気性となり、IOB の活性は低下する。

図6は、IOB の生菌数 8 × 10⁶ cell/g を含む pH 2.82 の酸性硫酸塩土壌に埋設され 0.59 mm/y の腐食速度を示したダクティル鋼鉄試験片の分極曲線を示したものである¹⁵⁾。埋設 90 日後は、埋設直後と比較してアノード及びカソード分極量が増加した。このことは、アノード反応及びカソード反応とも抑制されたことを意味する。

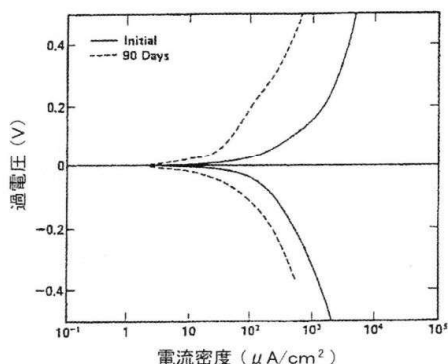


図6 IOBの生菌数8×10⁶ cell/gを含むpH 2.82の酸性硫酸塩土壌に埋設され0.59 mm/yの腐食速度を示したダクティル鋼鉄試験片の分極曲線¹⁵⁾

Fe/ 土壌界面の腐食特性は、バルクと比較してまったく異なるが特徴として以下のことが考察される。

- ① Fe/ 土壌界面はカソード反応によって生成する OH⁻ によりアルカリ性になる。
- ② Fe 表面上のアノードサイトから IOB のエネルギー源の Fe²⁺ が溶出する。すなわち、アノードサイトはバルクよりも Fe²⁺ 濃度が高い。IOB は、実際には還元鉄イオンがあまり存在しないような土壌中や水系にも広く分布していることを考えると、高い濃度の Fe²⁺ は必要ないかもしれない。しかし、IOB のエネルギー源である Fe²⁺ が Fe³⁺ に完全に酸化されてしまえば IOB の生育は停止するので、ある程度の Fe²⁺ の生成は要求されることが考えられる。
- ③ アノード方向に泳動、場合によってはアノードに吸着する SO₄²⁻ 等のアニオンがあると、Fe²⁺ と反応する。
- ④ カソードサイトにおけるカソード反応による O₂ の消費により、Fe/ 土壌界面はバルクよりも嫌気的になる。
- ⑤ 土壌中の細菌のかかりの菌数は土壌粒子に付着している。粘土粒子はカチオンを吸着することができるので Fe²⁺ - Fe³⁺ を吸着していると考え、微視的棲み場所 (micro-habitat) そのものの骨格は、Fe/ 土壌界面によって形成されることが考えられる¹⁶⁾。
- ⑥ Fe/ 土壌界面である微視的棲み場所 (micro-habitat) に棲む微生物の活性は、エネルギー源、栄養物、O₂ 濃度、pH、有害物質の有無、存在量、数値及びこれらの変化に依存する。

8. 酸性硫酸塩土壌中の鉄及び鋼の腐食

図7は、表面積 6 cm² のダクティル鋼鉄試験片に対し、質量減少より求めた腐食速度と AC インピーダンス法より求めた腐食速度を示したものである¹⁷⁾。埋設日数

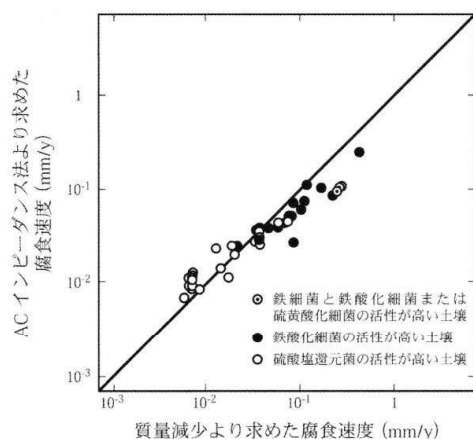


図7 微生物の活性の高い土壤中に埋設されたダクタイル鋼鉄試験片の質量減少より求めた腐食速度とACインピーダンス法より求めた腐食速度¹⁷⁾

は90日であった。図5よりACインピーダンス法は、腐食速度を求めるのに有効な電気化学的モニタリング手法であることが明らかとなった。最も大きい腐食速度を示したのは、IOBが 8×10^6 cell/g生息するpH 2.82の酸性硫酸塩土壤中に埋設されたダクタイル鋼鉄試験片で0.59 mm/yの値を示した。実験後の鋼鉄試験片/土壤のIOBの生菌数は 3×10^5 cell/g、pHは3.36であり、実験を通してIOBの活性は高かったといえる。なお、ACインピーダンス法の適用法については既報を参照されたい¹⁴⁾。

9. 酸性硫酸塩土壌中の鉄及び鋼の防食

酸性硫酸塩土壌における鋼及び鋼鉄の腐食防止に対し、カソード防食の適用は最も信頼性の高い防食法の一つといえる。カソード反応によって OH^- が生成し、Fe/土壌界面のpHが高くなり、酸性環境を中性環境に変化させることになる。ISO 15589-1: 2015は、炭素鋼、低合金鋼及び鋼鉄に対して防食電位を策定している¹⁸⁾。そこでは、嫌気性環境かつSRBの活動によって引き起こされる腐食リスクがある場合、防食電位として $-0.95 \text{ V}_{\text{CSE}}$ （飽和硫酸銅電極電位基準）を策定している。また、 $550 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ をこえる降伏強度で設計された高強度鋼、合金と低合金鋼でない鋼に対する水素脆性を防ぐために臨界限界電位は、証拠書類で立証されるか、実験によって決定されなければならないとしている。フィールド調査でSRBの生菌数が計数されたことから、防食電位 $-0.95 \text{ V}_{\text{CSE}}$ を適用すべきである。なお、海底堆積物中では、SRBの活動が顕著であることも意識しておく必要がある。

ISO 15589-1: 2015は、周囲の温度における酸性土壌と

水中のすべてのステンレス鋼に対して、防食電位と限界電位は証拠書類で立証されるか、実験によって決定されなければならないとしている。ただし、酸性土壌の定義に関する記述はない。

10. まとめ

宅地造成により地中にあった嫌気性土壌が地表に露出すると酸化する。嫌気性土壌中のSRBの活動で生成した非晶質のFeSより可酸化性硫黄化合物パイライト FeS_2 が生成し、これに対して化学的酸化反応と微生物反応が進行すると酸性を呈する酸性硫酸塩土壌が生成する。フィールド調査と文献調査より、 FeS_2 の酸化反応と酸性硫酸塩中に埋設された水道やガスのパイプラインの腐食防食について考察した結果は、以下の通りである。

- (1) 地表露出前の嫌気性土壌において硫酸塩還元菌が生成した準安定で非晶質のFeSはSと反応し、パイライト FeS_2 を生成する。地表露出後の土壌の酸化は、 FeS_2 の酸化であり、その反応過程で生じる H_2SO_4 によって酸性を呈する酸性硫酸塩土壌（潜在的酸性硫酸塩土壌を含む）が生成する。
- (2) FeS_2 の酸化は、空気中の酸素 O_2 ($4\text{FeS}_2 + 15\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 2\text{H}_2\text{SO}_4$)と、鉄酸化細菌の微生物反応で生成した $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ による化学的酸化反応 ($\text{FeS}_2 + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \rightarrow 3\text{FeSO}_4 + 2\text{S}^0$)で進行する。硫黄酸化細菌が活動すれば H_2SO_4 の生成によりさらにpHは低下する。
- (3) H_2SO_4 存在下で FeSO_4 を基質とするIOBが生育する ($4\text{FeSO}_4 + 2\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 2\text{H}_2\text{O}$)。 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ は FeS_2 を酸化する。
- (4) 生成された酸の溶脱や、雨水のような天然あるいは人為による中性化が経時的に進み、 $\text{pH} > 3$ になると $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ は加水分解する ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{H}_2\text{SO}_4$)。
- (5) pH 4程度までの中度の酸性条件下において、酸化された Fe^{3+} が部分的加水分解反応を受けて生成した $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ からジャロサイト (jarosite) $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ が生成する ($3\text{Fe}(\text{OH})_2^+ + 2\text{SO}_4^{2-} + \text{K}^+ \rightarrow \text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$)。
- (6) $\text{pH} > 4$ になると、ジャロサイトの化学的加水分解反応が起こり、ゲーサイト (goethite) FeOOH が生成する ($\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{FeOOH} + \text{KOH} + 2\text{H}_2\text{SO}_4$)。
- (7) FeS_2 の酸化によって生成した大量の H_2SO_4 のうちの多くは雨水、雪解け水などから下方への浸透、灌漑水とともに徐々に失われていくと考えられる。残りは土壌中の塩基性アルミニウム等の塩基性物質と反応して中和される。最後に残る $\text{Al}(\text{OH})\text{SO}_4$ なども湛水、排水の繰り返して徐々に

に吸着や加水分解されて排水中に失われる。酸性硫酸塩土壌中の硫化物がすべて酸化され、生成した酸がすべて排除された時の土壌 pH は、4.5 - 5.0 の範囲に落ち着く。しかしながら、pH 4.5 - 5.0 は、「極めて強酸性」から「強酸性」に分類されるので、酸性硫酸塩土壌地帯をさらに改良するためには、地形、気象等を十分考慮した灌漑や排水工事により良質な灌漑水で酸や塩基性硫酸塩を洗浄する必要がある。

- (8) 酸性硫酸塩土壌中に埋設される鉄及び鋼構造物は、腐食防止を万全なものとするためにカソード防食の適用が有効である。ISO 15589-1: 2015 は、防食電位として $-0.95 V_{CSE}$ (飽和硫酸銅電極電位基準) を策定している。また、 $550 N \cdot mm^{-2}$ をこえる降伏強度で設計された高強度鋼、合金と低合金鋼でない鋼に対する水素脆性を防ぐために臨境界電位は、証拠書類で立証されるか、実験によって決定されなければならないとしている。

参考文献

- 1) 久馬一剛, “第4章 熱帯、特に東南アジアにおける低湿地土壌の分布と特性”, 酸性土壌とその農業利用 ―特に熱帯における現状と将来―, 博友社 (1984).
- 2) J. R. Postgate, “Presence of Cytochrome in an Obligate Anaerobe”, *Biochemical Journal*, 56, VI (1954).
- 3) M. Ishimoto, J. Koyama, T. Yagi, M. Shiraki, “Biochemical studies on sulfate-reducing bacteria: VII. Purification of the cytochrome of sulfate-reducing bacteria and its physiological role”, *The Journal of Biochemistry*, Vol.44, Issue 7, pp.413 ~ 423 (1957).
- 4) 今井和民, “独立栄養細菌”, 化学同人 (1984).
- 5) S. A. Waksman, J. S. Joffe, “Microorganisms Concerned in the Oxidation of Sulfur in the Soil”, *Journal of Bacteriology*, 7, pp.239 ~ 256 (1922).
- 6) E. Olsen, W. Szybalski, “Aerobic Microbiological Corrosion of Water Pipes. I”, *CTAA CHEMICA SCANDINAVICA*, 3, pp.1094 ~ 1105 (1949).
- 7) 梶山文夫, “重炭酸イオンを含有し鉄細菌が生息する好気性アルカリ性土壌に埋設された天然ガス輸送ダクト鉄管の錆腐形成メカニズム”, 防錆管理, Vol.66, No.1, pp.35 ~ 39 (2022).
- 8) P. Bos, J. G. Kuenen, “Microbiology of sulphur-oxidizing bacteria”, *Microbial Corrosion, Proceedings of the conference sponsored and organized jointly by The National Physical Laboratory and The Metals Society and held at NPL*, pp.18 ~ 27 (1983).
- 9) J. Shamshuddin, A. Elisa Azura, M. A. R. S. Shazana, C. I. Fauziah, Q. A. Panhwar, U. A. Naher, “Chapter Three - Properties and Management of Acid Sulfate Soils in Southeast Asia for Sustainable Cultivation of Rice, Oil Palm, and Cocoa”, *Advances in Agronomy, Elsevier*, Vol.124, pp.91 ~ 142 (2014).
- 10) 久保田鉄工株式会社, “海成粘土と硫化物”, アーバンクボタ, N.23, p.10 (1984).
- 11) F. Kajiya, “Elucidating ductile iron pipeline corrosion in acid soil containing iron-oxidizing bacteria”, *CECOR* (2024).
- 12) 吉田 稔, “第5章 土壌酸性の土壌化学的解析”, 酸性土壌とその農業利用 ―特に熱帯における現状と将来―, p.144, 博友社 (1984).
- 13) 梶山文夫, “電気化学的手法を用いた鉄管の土壌腐食に関する研究”, 東京工業大学博士学位論文 (1989).
- 14) 梶山文夫, “好気性硫酸酸性環境下において酸素と水素イオンの拡散限界電流密度で決定される pH に依存する鉄酸化細菌の活動と鉄表面の状態”, 防錆管理, Vol.68, No.12, pp.413 ~ 415 (2024).
- 15) 梶山文夫, 笠原見明, “埋設鉄管の微生物腐食と電気化学的挙動”, 第38回 腐食防食討論会 C - 212, 腐食防食協会, pp.243 ~ 246 (1991).
- 16) 服部 勉, “微生物生態入門”, 第2版, 東京大学出版会 (1995).
- 17) F. Kajiya, K. Okamura, Y. Koyama, K. Kasahara, “Microbiologically Influenced Corrosion (MIC) of Ductile Iron Pipes in Soils”, *Microbiologically Influenced Corrosion Testing*, Kearns/Little, editors, ASTM Publication Code Number (PCN) 04-012320-27 (1994).
- 18) ISO 15589-1: 2015, “Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Cathodic protection of pipeline systems — Part 1: On-land pipelines”, Second edition (2015).

受理日: 令和6年11月19日

潜在的酸性硫酸塩土壌かつ有機質土壌の特性を有する土壌に対する 鋳鉄パイプラインの腐食

梶 山 文 夫*

Fumio KAJIYAMA

377箇所に埋設されたコーティングの無い鋳鉄パイプラインに対する腐食フィールド調査と実験室での研究より、最も激しい腐食は、潜在的酸性硫酸塩土壌 (Potential acid sulfate soil, PASS) かつ有機質土壌 (Organic soil) の特性を有する土壌 (PAAS + Organic soil) で起こる。この土壌は、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2) < 3.5$ 、有機物含有量 $\geq 20\%$ 及び粘土分含有量 $\geq 40\%$ の3条件の特性を有する。PAAS + Organic soil の具体的な特性は、 $\text{pH}: 5.54 - 6.68$ 、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2): 2.22 - 3.79$ 、 $\text{SO}_4^{2-}: 12 - 135 \text{ mass ppm}$ 、鉄酸化細菌が生息しない、ダクタイル鋳鉄クーボンの腐食電位がほとんど $-0.80 \text{ V}_{\text{CSE}}$ よりもマイナスを示す。このことは、土壌中にはまだ酸化していない FeS_2 が残存していることを意味する。局所的な土壌のしまりと水分保持力の差は通気差電池を形成し、酸素濃度の低いサイトがアノード、酸素濃度の高いサイトがカソードとなりアノードが激しい腐食を起こすことになる。

キーワード：酸性硫酸塩土壌、潜在的酸性硫酸塩土壌、活性酸性硫酸塩土壌、有機質土壌、鋳鉄パイプライン腐食、 FeS_2 、可酸化性硫黄化合物、 pH 、 SO_4^{2-} 濃度、鉄酸化細菌、硫酸塩還元菌

1. はじめに

宅地造成により地中にあった可酸化性硫黄化合物 (oxidizable sulfur compounds) を含有する嫌気性土壌が地表に露出するようになると、嫌気性土壌は空気による乾燥・酸化と雨水 ($\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$) の作用及び O_2 存在下での鉄酸化細菌 (iron-oxidizing bacteria, IOB) と硫黄酸化細菌 (sulfur-oxidizing bacteria, SOB) の作用を受け硫酸が生成し酸性を呈する酸性硫酸塩土壌 (acid sulfate soil, ASS) になることが明らかになっている。可酸化性硫黄化合物に起因する酸性硫酸塩土壌は、 $\text{pH} < 3.5$ の極めて強い酸性を呈する活性酸性硫酸塩土壌 (active acid sulfate soil, AASS) と、酸化が進むと活性酸性硫酸塩土壌に成りうる、生化学的に還元された状況が維持され硫化物が化学的に安定である潜在的酸性硫酸塩土壌 (potential acid sulfate soil, PASS) に大別される。PASS は $\text{pH} < 3.5$ ではないが、 H_2O_2 を加えることによって、いまだ酸化しないで土壌中に残存している可酸化性硫黄を強制的に酸化させた後の pH 、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ と称する、 < 3.5 の土壌をさすことにする。なお、ここでは

可酸化性硫黄化合物として硫化鉄 FeS と元素状硫黄 S が結合したパイライト (pyrite FeS_2 、黄鉄鉱) を取り上げた。これは、久馬の海底堆積物中の還元型硫黄化合物で、パイライト態硫黄が全硫黄の 95% 以上を占めるのが一般であり、元素状硫黄、有機態硫黄なども少量存在するが、 FeS 態硫黄は極めて少量しか存在しない。パイライトの蓄積量は乾燥堆積物重あたり $1 \sim 4\%$ 程度が普通であり、まれに 5% 以上にも達するという報告による¹⁾。

本稿は、潜在的酸性硫酸塩土壌かつ有機質土壌の特性を有する PASS + Organic soil 土壌が鋳鉄パイプラインに対し激しい腐食を起こすことを明らかにしたので、その結果について述べることにする。なお、土壌環境は常温・常圧とした。

2. 酸性硫酸塩土壌 (acid sulfate soil, ASS)^{2),3)}

酸性硫酸塩土壌は、硫化物鉱物 (無機化合物) から成る土壌成分を含む、又は鉄硫化物鉱物、おもにパイライト (FeS_2)、の特性の完全な変化によって作用された土壌である。水で飽和された自然の嫌気性状態において、

*元 東京ガスネットワーク株式会社 (〒105-8527 東京都港区海岸 1-5-20) 工学博士
Tokyo Gas Network Co., Ltd. (5-20, Kaigan, 1-Chome, Minato-ku, Tokyo, 105-8527, Japan) Dr. Eng

酸性硫酸塩土壌は腐食性が極めて低い。しかしながら、土壌が干上がった好気の状態において、 FeS_2 及び硫化物化合物の化学的酸化又は微生物学的酸化反応が起こり、その結果として H_2SO_4 の生成により土壌を極度の酸性 ($\text{pH} \leq 4$ 、しばしば $\text{pH} < 3$) にする。このことは、これまで地中にあった可酸化性硫黄化合物 (oxidizable) の硫化物成分を含有する嫌気性土壌が宅地造成により地表に露出し好気的環境にさらされると、土壌は $\text{pH} \leq 4$ の強酸性になり、裸の鑄鉄表面が H_2SO_4 を含む電解質によって腐食することを意味する。空気による乾燥・酸化と雨水 ($\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$) の作用及び O_2 存在下での鉄酸化細菌 (iron-oxidizing bacteria, IOB) と硫黄酸化細菌 (sulfur-oxidizing bacteria, SOB) の作用を受け硫酸が生成し酸性を呈する酸性硫酸塩土壌 (acid sulfate soil) になることが明らかになっている。

酸性硫酸塩土壌には2つのタイプがある。すなわち、「活性酸性硫酸塩土壌」と「潜在的酸性硫酸塩土壌」である。

2.1 活性酸性硫酸塩土壌 (active acid sulfate soil, AASS)

活性酸性硫酸塩土壌は、硫黄層位を持ち、過度の硫化物成分の酸化によって強い酸性を呈する。硫化物材料の酸化により強い酸性を有する土壌をいう。おもにパイライト FeS_2 の酸化によって硫酸が生成されるのが、強酸性の原因である。本稿では、活性酸性硫酸塩土壌は土壌 $\text{pH} < 3.5$ の土壌とする。 FeS_2 の酸化は、地中にあった土壌が地表に露出され、露出時間の長いほど進行する。その場合、嫌気性環境の潜在的酸性硫酸塩土壌は活性酸性硫酸塩土壌に変態する。宅地造成工事により、土壌が地表に露出した後、舗装により露出時間が短い場合、土壌の酸化の進行は緩やかに進行する。

2.2 潜在的酸性硫酸塩土壌 (potential acid sulfate soil, PASS)

生化学的な還元状態が土壌中で保持される場合、硫化物鉱物は化学的に安定を保たれ、潜在的酸性硫酸塩土壌とみなされる。潜在的酸性硫酸塩土壌が酸化状態にさらされると硫酸が生成する。硫酸の生成により、潜在的酸性硫酸塩土壌は、活性酸性硫酸塩土壌に変態する。本稿では、潜在的酸性硫酸塩土壌は土壌に過酸化水素添加後の pH 、これを $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ とし、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2) < 3.5$ の土壌とする。

2.3 潜在的酸性硫酸塩土壌かつ有機質土壌 (PASS + Organic soil)

本稿において、データの解析結果より潜在的酸性硫酸塩土壌かつ有機質土壌を新たに定義した。この土壌は、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2) < 3.5$ 、有機物含有量 $\geq 20\%$ 、粘土分含有量 $\geq 40\%$ の3条件を満足する。

3. 60 m に亘って土壌埋設されたダクトイル鉄管の腐食フィールド調査と解析⁴⁾

腐食フィールド調査対象は、60 m に亘る裸の呼び径 200 mm、管厚 10.0 mm の低圧天然ガスダクトイル鉄管で、埋設年数は 17 年であった。土質は粘土からローム質で抵抗率は 11.20 から 404 Ωm 、平均は 55.01 Ωm であった。ダクトイル鉄管は裸で土壌と直接接触していた。そこで、このダクトイル鉄管は土壌の腐食性の影響を強く受けて腐食することになる。ダクトイル鉄管が裸であるので、異種土壌マクロセル等の形成により腐食する可能性がある。ダクトイル鉄管に対して $X \text{ m} \pm 0.5 \text{ m}$ ($X = 0.1, 2, \dots, 60$) の計測した腐食深さのうち最大腐食深さを抽出し、最大腐食速度を求めた。ただし、0 m と 60 m 地点は 0.5 m の片側のみの計測範囲であった。1 m 間隔で土壌特性値、微生物の生菌数の計数を行った。

3.1 埋設された鑄鉄パイプラインの最大腐食速度

図1は、ダクトイル鉄管に沿って 1 m 間隔で得られた最大腐食速度を示したものである。最大腐食速度は 36 m 地点の $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ 3.82、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ 3.20 の潜在的酸性硫酸塩土壌で得られた 0.405 mm/y で、鉄酸化細菌の生菌数が $1 \times 10^5 \text{ cell/g}$ の大きな値を示し、硫酸塩還元菌 (sulfate-reducing bacteria, SRB) の生菌数が $1 \times 10^2 \text{ cell/g}$ であったが、硫黄酸化細菌の生菌数はゼロであった。以上の計測値は、現在活動的な腐食が起こっていたことを示す。0.3 mm/y よりも高い最大腐食速度は、隣接する 35 - 45 m 区間でみられた。鉄酸化細菌は土壌のすべてのサンプルでみられなかった。

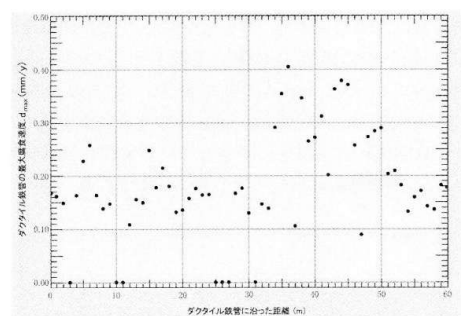


図1 60 mに亘って土壌埋設されたダクトイル鉄管に沿って1 m間隔で得られた最大腐食速度

3.2 ダクトイル鉄管に沿った土壌 pH と $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$

図2は、管が露出後、ダクトイル鉄管に沿って 1 m 間隔で計測した土壌 pH と $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ を表したものである。ここで、 pH は土壌水の pH である。 pH は 3.73 から 6.87 の範囲にあり、平均値は 5.03 であった。吉田は、 pH が 4.9 以下はきわめて強酸性、 pH が 5.0 から 5.4 は

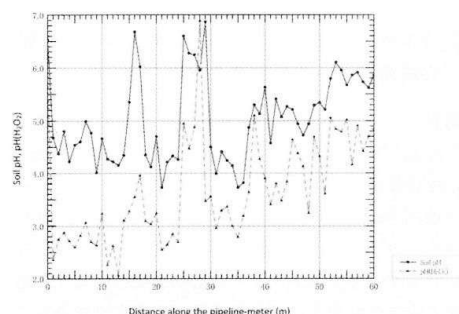


図2 管路に沿った土壌pHとpH(H₂O₂)

強酸性と評価している。総数61のうちpHが5.4以下の値を示したのは42点で（最小値3.73、最大値5.35、平均値4.58）68.9%であった。それゆえ吉田の評価⁵⁾に基づく60 mのスパンは大まかに強酸性の土壌といえる。pH < 3.5の酸性硫酸塩土壌はみられなかった。60 mの調査スパンのうち51 mから60 mまでの土壌のpH(H₂O₂)が3.5よりも高かったことから、51 mから60 mは非酸性硫酸塩土壌地帯といえる。IOBの生菌数は検出されなかった。SRBの生菌数は検出されたが、FeS濃度がND（検出されず）から54 mass ppmと低かったことから、SRBの活性はフィールド調査時点では低かったものと判断される。FeS濃度の分析は、ZnとHClで分析試料の硫化物をH₂Sで追い出した後、H₂S吸収液にZnSとして固定し、比色計で670 nmにおける吸光度を計測してS²⁻濃度を求めた⁶⁾。よってFeS態Sを求めたものといえる。FeSはH₂O₂により強制的に酸化される。

図3は、土壌のpH(H₂O)とpH(H₂O₂)との関係を明確にするために両者の関係図を示したものである。pH(H₂O)は土壌pHのことである。図中の点線のpH(H₂O₂) 3.5以下の土壌は、潜在的酸性硫酸塩土壌である。pH(H₂O₂)は土壌中に残存している可酸化性硫黄をH₂O₂により強制的に酸化させた後のpHである。両者の

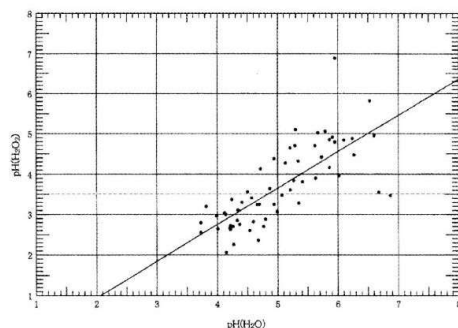


図3 土壌pH(H₂O)とpH(H₂O₂)との関係
(pH(H₂O)は図2の土壌pHを表わす)

間には、相関係数0.747の正相関がみられた。pH(H₂O)が低いほどpH(H₂O₂)が低かった。pH(H₂O₂)が低いということは、土壌中にはまだ酸化していないFeS₂が残存していることを意味する。

3.3 FeS濃度とpH(H₂O₂)との関係

図4は、pH(H₂O₂) < 3.5のpH(H₂O₂)とFeS濃度との関係を示したものである。FeS濃度は、HClを用いた分析方法からFeS₂を除く非晶質のFeS値である。

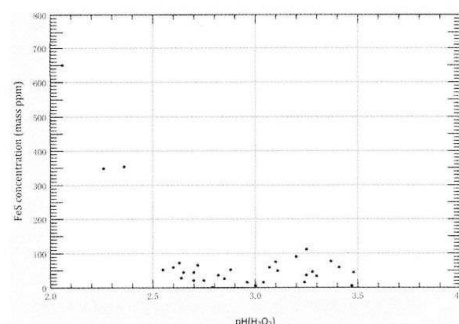


図4 pH(H₂O₂) < 3.5とFeS濃度との関係

表1は、図4でpH(H₂O₂) < 3.5かつ100 mass ppmよりも高いFeS濃度を示した4サンプルの土壌の特性値を示したものである。これらの特性値は、フィールド調査時点の値である。そこで、特にFeS濃度とSO₄²⁻濃度はH₂O₂による土壌の強制酸化前の値である点に注意する必要がある。表1より以下のことが明らかになった。なお、表1で微生物の生菌数は最確値法により求めた。SRBの培養はPostgateのB寒天培地を、IOBの培養は大阪発酵研究所推奨の液体培地をそれぞれ用いた⁶⁾。

- 1) pHが4.15から4.94、pH(H₂O₂)が3.25以下の酸性で、潜在的酸性硫酸塩土壌であった。
- 2) IOBの生菌数はゼロであったが、SRBの生菌は確認された。IOBは酸性条件下でなければ生育できない。Fe²⁺はpH 3.5以上になるとO₂による自動酸化が強くなり、基質が自然に消失してしまったためと考えられる⁷⁾。
- 3) 100 mass ppmよりも高いFeS濃度は、生菌数7 × 10 cell/g以上のSRBによって生成した非晶質のFeSの濃度である。
- 4) No.13は有機物含有量、粘土分含有率、含水比が最も小さかったが、FeS含有量は650 mass ppmと最も高くpH(H₂O₂)が2.06と最も低かった。H₂O₂によってFeSが強制的に酸化されたものといえる。

表1 pH(H₂O₂) < 3.5かつ100 mass ppmよりも高いFeS濃度を示した4つの土壌の特性値

No.	最大腐食速度 mm/y	ダクタイル 鋳鉄カーボンの腐食電位 E _{corr} /V _{CSE}	有機物含有量 %	粘土分含有率 %	みかけの密度 Mg/m ³	酸化還元 電位Eh V _{NHE}	土壌pH pH(H ₂ O ₂)	含水比	乳酸濃度	酢酸濃度	Fe ²⁺ 濃度	FeS濃度	SO ₄ ²⁻ 濃度	微生物の生菌数	
								w _c						SRB	IOB
								%	mass ppm						cell/g
1	0.161	-0.679	0.68	11	2.589	0.524	4.68 2.36	25.8	ND	ND	120	353	10755	7×10 ³	0
11	0	-0.707	0.62	3	2.639	0.609	4.27 2.26	31.1	3.4	ND	10	348	6260	1×10 ³	0
13	0.155	-0.688	0.43	2	2.626	0.504	4.15 2.06	22.7	2.2	1.4	82	650	4818	1×10 ³	0
48	0.273	-0.777	1.08	14	2.640	0.599	4.94 3.25	62.4	—	—	15	111	788	1×10 ³	0

ND：検出されず、—：計測せず

4. 関東地方の377地点に埋設された鋳鉄パイプラインの腐食フィールド調査と解析⁸⁾

4.1 関東地方の377地点のpH(H₂O₂)と埋設された鋳鉄パイプラインの最大腐食深さ

図5は、関東地方の377地点のpH(H₂O₂)と埋設された鋳鉄パイプラインの最大腐食深さを示したものである。プロットに付した上矢印は腐食調査時に穿孔に至ったことを意味している。377地点の土壌を潜在的酸性硫酸塩土壌(pH(H₂O₂) < 3.5、PASS)、有機質土壌(有機物含有量 ≥ 20%、Organic soil)、潜在的酸性硫酸塩土壌かつ有機質土壌の特性を有する土壌(pH(H₂O₂) < 3.5、有機物含有量 ≥ 20%かつ粘土分含有率 ≥ 40%を満たす、PASS + Organic soil)及びその他の土壌に分類した。図4のデータ解析より、PASS + Organic soilが埋設された鋳鉄パイプラインに対し激しい腐食をもたらすことが明らかになった。

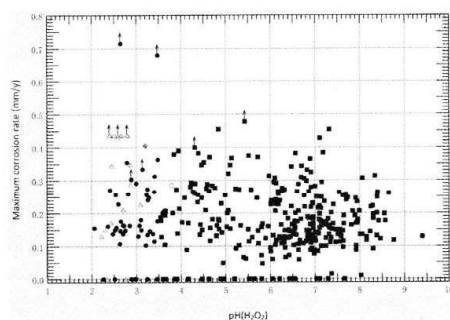


図5 関東地方の377地点のpH(H₂O₂)と最大腐食速度との関係 (●：PASS、○：Organic soil、△：PASS + Organic soil、■：その他土壌)

4.2 有機物含有量と土壌特性値との関係

PASS、Organic soil及びPASS + Organic soilを一括

りとした土壌の有機物含有量と粘土分(≤ 5 μm)含有率、みかけの密度及び含水比との関係について以下に述べる。

4.2.1 有機物含有量と粘土分 ≤ 5 μm 含有率との関係

図6は、粘土分 ≤ 5 μm の含有率と有機物含有量との関係を示したものである。両者の間には0.799の有意な高い正相関がみられた。図6が示すように粘土分 ≤ 5 μm の含有率 ≥ 40%で有機物含有量 ≥ 20%の場合、潜在的酸性硫酸塩土壌かつ有機質土壌の特性を有する土壌(PAAS + Organic soil)が該当することがわかる。

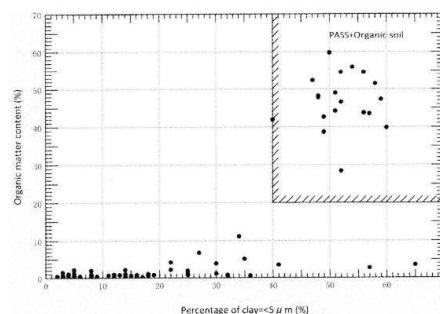


図6 粘土分 ≤ 5 μm 含有率と有機物含有量との関係

4.2.2 有機物含有量とみかけの密度との関係

図7は、みかけの密度と有機物含有量との関係を示したものである。両者の間には-0.985の有意な高い負相関がみられた。

4.2.3 有機物含有量と含水比との関係

図8は、含水比と有機物含有量との関係を示したものである。両者の間には0.972の有意な高い正相関がみられた。含水比 ≥ 200%であると有機物含有量 ≥ 20%であることが明らかになった。

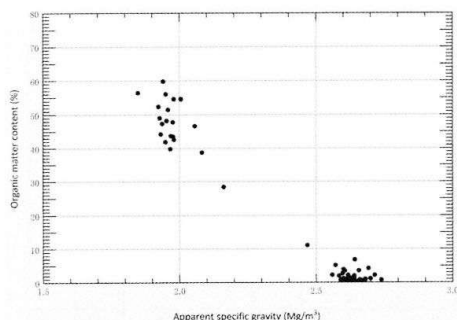


図7 みかけの密度と有機物含有量との関係

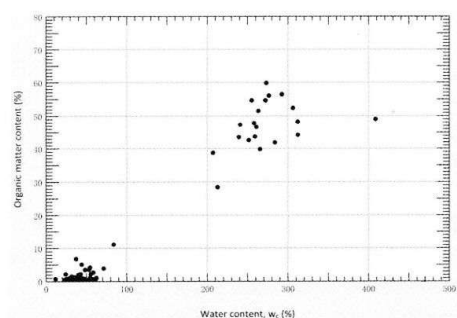


図8 含水比と有機物含有量との関係

4.2.4 有機物含有量とダクトイル鑄鉄クーボンの腐食電位との関係

図9は、ダクトイル鑄鉄クーボンの腐食電位と有機物含有量との関係を示したものである。表面積 10 cm^2 の光沢のあるダクトイル鑄鉄クーボンはフィールド調査時に設置したもので、クーボンの腐食電位がよりマイナスであれば土壌が嫌気性であることを意味する。潜在的酸性硫酸塩土壌と有機質土壌の特性を有する土壌 (PASS + Organic soil) に埋設されたダクトイル鑄鉄クーボンの腐食電位は、 $-0.75 \text{ V}_{\text{CSE}}$ よりマイナスの値を示し、ほと

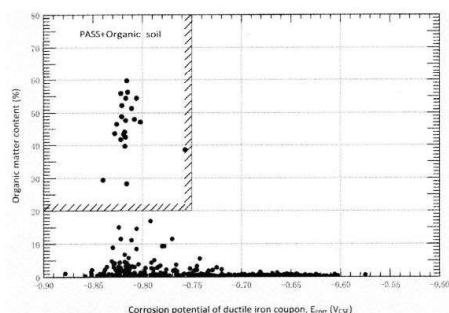


図9 ダクトイル鑄鉄クーボンの腐食電位と有機物含有量との関係

んどが非常に嫌気性であることを示す $-0.80 \text{ V}_{\text{CSE}}$ よりマイナスの値を示した。このことは、PASS + Organic soil に埋設された銅及び鑄鉄は腐食するアノードの傾向になることを意味する。

4.3 潜在的酸性硫酸塩土壌かつ有機質土壌の特性を有する土壌の特性値

表2は、潜在的酸性硫酸塩土壌かつ有機質土壌の特性を有する20サンプルの土壌 (PAAS + Organic soil) の特性値を示したものである。なお、表中の括弧の数値は鑄鉄パイプライン表面にみられた腐食生成物の計測値である。腐食生成物に多量の FeS 濃度がみられた場合、低い酸化還元電位、中性の pH と対応した。

PAAS + Organic soil は、

- pH が弱酸性の 5.54 から 6.68、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ が 2.22 から 3.79、 SO_4^{2-} 濃度が低い 12 から 135 mass ppm、IOB の生菌数がゼロであったことから、いまだ酸化していない FeS_2 の可酸化性硫黄が残存していることがわかった。IOB の生菌数がゼロであったのは、粘土分含有率が 40 % 以上と高く、IOB の基質である Fe^{2+} が粘土粒子に吸着し、IOB が細胞内に取り込めなかったためと考えられる。
- ダクトイル鑄鉄クーボンの腐食電位は、ほとんどが $-0.8 \text{ V}_{\text{CSE}}$ よりマイナスの嫌気性土壌で通気差電池のアノードになる傾向を示す値であったが、SRB の生菌数が 3×10^2 から $1 \times 10^4 \text{ cell/g}$ 、SRB の活動の結果生成する FeS 濃度が ND から 23 mass ppm と低かったことから、SRB の活性は低かったものといえる。

潜在的酸性硫酸塩土壌 (PASS) から活性酸性硫酸塩土壌 (AASS) への移行は、PASS の酸化速度の大きさにかかっている。IOB が活動している場合、酸化の速度は活動していない場合と比較して桁違いに大きくなる⁹⁾。都市部のように土壌露出後、道路が舗装されると舗装面下の土壌の酸化は進まない状況になることも酸化速度を抑えている要因と考えられる。

5. 活性酸性硫酸塩土壌中のダクトイル鑄鉄クーボンの腐食¹⁰⁾

pH 2.82、 SO_4^{2-} 濃度 1400 mass ppm、鉄酸化細菌 IOB の生菌数 $8 \times 10^6 \text{ cell/g}$ 、硫黄酸化細菌 SOB の生菌数 $2 \times 10^2 \text{ cell/g}$ の活性酸性硫酸塩土壌に表面積 6 cm^2 のダクトイル鑄鉄クーボンを 90 日間埋設したところ質量減少値より 0.59 mm/y の腐食速度が得られた。実験後のダクトイル鑄鉄クーボン/土壌の IOB の生菌数は $3 \times 10^5 \text{ cell/g}$ 、pH は 3.36 であり、実験を通して IOB の活性は高かったといえる。

図10は、AC インピーダンスの経時変化を示したものである。AC インピーダンスから得られる電荷移動抵抗抗

表2 潜在的酸性硫酸塩土壌かつ有機質土壌の特性を有する土壌 (PASS + Organic soil) の特性値

No.	最大 腐食 速度	ダクタイル 鋳鉄クーボンの 腐食電位 E _{corr}	有機物 含有量	粘土分 含有率	みかけ の密度	酸化還元 電位Eh ()内は、 腐食生成物	土壌pH pH(H ₂ O ₂) ()内は、 腐食生成物	含水比 w _c	乳酸 濃度	酢酸 濃度	Fe ²⁺ 濃度		FeS 濃度 ()内は、 腐食生成物	SO ₄ ²⁻ 濃度	微生物の 生菌数	
											SRB	IOB				
															cell/g	
50	≧ 0.435	-0.757	38.7	49	2.082	0.519 (0.159)	5.94 2.80 (7.06)	207.0	ND	ND	9	16 (844)	135	6×10 ²	0	
51	≧ 0.435	-0.819	43.5	57	1.977	0.479	6.03 2.68	239.3	20	3	8	13	70	9×10 ²	0	
52	0.343	-0.817	42.6	49	1.980	0.459	5.76 2.45	251.6	4	ND	23	9	39	4×10 ²	0	
53	≧ 0.435	-0.802	47.3	59	1.937	0.539	5.88 2.86	241.0	33	ND	13	ND	30	1×10 ⁴	0	
55	0.131	-0.806	54.6	56	2.005	0.439	5.72 2.22	255.0	ND	6	26	6	26	6×10 ²	0	
56	0.149	-0.816	59.8	50	1.940	0.529	6.16 2.31	273.1	ND	1	11	ND	48	4×10 ²	0	
57	≧ 0.435	-0.808	48.2	48	1.953	0.459	6.14 2.64	312.3	22	4	23	ND	110	4×10 ³	0	
58	0.429	-0.818	39.8	60	1.966	5.80 2.59	265.3	ND	3	293	293	ND	33	1×10 ³	0	
59	0.170	-0.822	41.9	40	1.949	0.429	5.96 2.43	283.9	3	5	538	ND	35	8×10 ²	0	
60	0	-0.817	54.6	52	1.979	0.459	5.93 2.76	272.0	14	ND	15	ND	38	6×10 ²	0	
61	0	-0.821	49.0	51	1.928	0.549	5.82 2.88	408.9	12	3	13	ND	26	1×10 ⁴	0	
62	0	-0.817	47.8	48	1.976	0.539	6.09 2.33	258.2	ND	4	10	ND	20	1×10 ³	0	
63	0.285	-0.840	29.5	47	2.167	0.519	6.50 3.79	186.8	9	4	ND	ND	12	3×10 ³	0	
64	0	-0.828	43.7	56	1.969	0.519	5.54 3.03	259.3	24	13	19	ND	30	5×10 ²	0	
65	≧ 0.435	-0.826	46.6	52	2.057	0.499 (0.129)	5.96 2.40 (7.28)	261.0	8	7	9	ND (20800)	28	1×10 ³	0	
66	0.287	-0.822	56.0	54	1.950	0.439	6.30 2.88	276.3	18	6	10	ND	42	3×10 ³	0	
67	0.225	-0.816	28.4	52	2.162	0.479 (0.219)	6.68 3.10 (6.87)	212.9	13	4	11	ND (157)	20	9×10 ²	0	
68	0.209	-0.811	51.5	58	1.958	0.559	5.75 2.71	263.4	28	2	18	ND	55	4×10 ³	0	
69	≧ 0.435	-0.818	44.2	51	1.932	0.459	5.70 2.60	312.5	10	8	20	23	41	6×10 ²	0	
70	0	-0.821	52.4	47	1.923	0.539	5.65 2.34	306.1	6	10	6	ND	47	3×10 ²	0	

ND: 検出されず

R_{ct} より全面腐食速度が得られることが明らかにされている¹¹⁾。埋設3日目にみられた誘導性ループは、 SO_4^{2-} のFe酸化物表面への特異吸着が反映された可能性が高いと考えられる¹²⁾。埋設90日後にみられた2つの容量性半円は、Fe酸化物とその外液のFeS皮膜によるものとみなされる。

図11は、活性酸性硫酸塩土壌に埋設されたダクタイル鋳鉄試験片の埋設時と埋設90日後の分極曲線を示したものである。アノード反応 ($\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$)、カ

ソード反応 ($2\text{H}^+ + 1/2\text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$) の双方が経時的に抑制されたといえる。アノード反応の抑制は腐食生成物の形成、カソード反応の抑制は H^+ と O_2 が消費された結果、IOBの活性低下によるものと考えられる。

6. まとめ

潜在的酸性硫酸塩土壌かつ有機質土壌の特性を有する土壌の、鋳鉄パイプラインの腐食に及ぼす影響に着目し

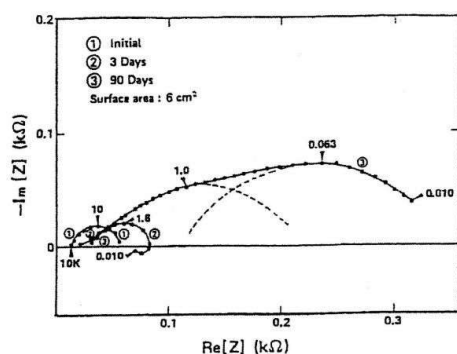


図10 活性酸性硫酸塩土壌に埋設されたダクタイル鋳鉄クーボンのACインピーダンスの経時変化

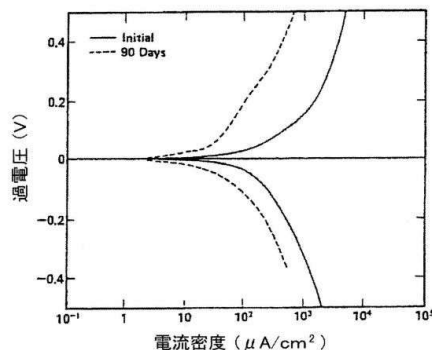


図11 活性酸性硫酸塩土壌に埋設されたダクタイル鋳鉄クーボンの分極曲線の経時変化

た。微生物の腐食挙動についていまだ明らかにされていない点が多いが、腐食フィールド調査と実験室研究から得られた結論及びその考察は、以下の通りである。

- (1) 潜在的酸性硫酸塩土壌 ($\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2) < 3.5$) かつ有機質土壌 (有機物含有量 $\geq 20\%$ 、粘土分含有量 $\geq 40\%$) の特性を有する土壌 (ここでは、PAAS + Organic soil と称する) に埋設された鋳鉄パイプラインに $\geq 0.435 \text{ mm/y}$ の激しい腐食がみられた。大きな腐食速度をもたらした PAAS + Organic soil の抵抗率は 46.30 から $10^7 \Omega\text{m}$ であり、 $30 \Omega\text{m}$ をこえる抵抗率は土壌の腐食性の指標にならないという判断¹³⁾ を裏づけた。

- (2) PAAS + Organic soil は、 pH が弱酸性の 5.54 から 6.68 、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2)$ が 2.22 から 3.79 、 SO_4^{2-} 濃度が低い 12 から 135 mass ppm 、IOB の生菌数がゼロであったことから、いまだ酸化していない FeS_2 の可酸化性硫黄が残存していることがわかった。

光沢のあるダクタイル鋳鉄クーボンの腐食電位は、ほとんどが $-0.8 \text{ V}_{\text{CSE}}$ よりマイナスの嫌気性土壌で通気差電池のアノードになる傾向を示す値であったが、SRB の生菌数が 3×10^2 から $1 \times 10^4 \text{ cell/g}$ 、SRB の活動の結果生成する FeS 濃度が ND から 23 mass ppm と低かったことから、SRB の活性は低かったものといえる。潜在的酸性硫酸塩土壌 (PASS) の活性酸性硫酸塩土壌 (AASS) への移行は、PASS の酸化速度の大きさにかかっている。土壌が露出した状態で IOB が活動している場合、土壌の酸化速度は飛躍的に大きくなり、強酸性がもたらされる。一方、都市部のように土壌露出後、道路が舗装されると舗装面下の土壌の酸化は進みにくい状況になる。

- (3) 関東地方の 377 サンプルのうち PASS、Organic

soil 及び PASS + Organic soil を一括りとした土壌の有機物含有量は、

- a) 粘土分含有量が高いほど、
- b) みかけの密度が小さいほど、
- c) 含水比が高いほど、

大きくなった。有機物含有量と、粘土分含有量、みかけの密度、含水比とのそれぞれの相関係数は 0.799 、 -0.985 、 0.972 といずれも有意で非常に高い相関を示した。これらの高い相関は、帯電した粘土粒子を含む土壌がフカフカでしまりの程度が弱く、細くて多くの孔隙を有し含水比の高い水分の保持力が強いことが反映されているものとみなされる。

- (4) PAAS + Organic soil は、 $\text{pH} < 5$ 、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}_2) \leq 3.25$ の PAAS と比較して FeS 含有量は低かった。また、有機物含有量、粘土分含有率と含水比は高く、みかけの密度が小さかった。PAAS + Organic soil は、有機物と帯電した粘土粒子との結合、粘土粒子に吸着するカチオン、粘土粒子と微生物細胞の相互作用等と水分の強い保持力の化学的、微生物学的、物理的特性より O_2 等の溶存気体や溶質の拡散速度が小さいために土壌の酸化速度が小さかったものといえる¹⁴⁾。
- (5) Postgate¹⁵⁾ と Ishimoto ら¹⁶⁾ の研究によって、SRB の *Desulfovibrio* 属の菌はこの属に特異的な cytochrome C_3 をもち、嫌気性菌と好気性菌の中間的性格をもつことを明らかにされた。このことは、表 1 に示す好気性環境でも SRB が 7×10 から $1 \times 10^2 \text{ cell/g}$ 生息し、SRB の活動の結果 FeS 濃度が 111 から 650 mass ppm 得られたことを説明可能とするものである。

謝辞

本研究の遂行とその考察に当たり、東北大学名誉教授服部 勉先生に長年にわたり貴重なご意見をいただきました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 久馬一剛：“第4章 熱帯、特に東南アジアにおける低湿地土壌の分布と特性”、酸性土壌とその農業利用 一特に熱帯における現状と将来一、p.104、博友社（1984）。
- 2) J. Shamshuddin, A. Elisa Azura, M. A. R. S. Shazana, C. I. Fauziah, Q. A. Panhwar, U. A. Naher”, “Chapter Three – Properties and Management of Acid Sulfate Soils in Southeast Asia for Sustainable Cultivation of Rice, Oil Palm, and Cocoa”, *Advances in Agronomy*, Elsevier, Vol.124, pp.91 ~ 142（2014）。
- 3) D. L. Sparks, B. Singh, M. G. Siebecker, “Soil Survey Technical Note 430-SS-11 Acid Sulfate Soils in the Coastal and Subaqueous Environment”, *Environmental Soil Chemistry*, Third Edition, Chapter 9, The Chemistry of Soil Acidity, U. S. Department of Agriculture, Farm Production and Conservation, Natural Resources Conservation Service, Soil and Plant Science Division, pp.1 ~ 9（2024）。
- 4) F. Kajiya, “Elucidating ductile iron pipeline corrosion in acid soil containing iron-oxidizing bacteria”, *CEOCOR*（2024）。
- 5) 吉田 稔：“第5章 土壌酸性の土壌化学的解析”、酸性土壌とその農業利用 一特に熱帯における現状と将来一、p.144、博友社（1984）。
- 6) 梶山文夫：“電気化学的手法を用いた鉄管の土壌腐食に関する研究”、東京工業大学博士学位論文（1989）。
- 7) 今井和民：“独立栄養細菌”、化学同人（1984）。
- 8) 梶山文夫、未発表データ。
- 9) 例えば、久馬一剛：“第4章 熱帯、特に東南アジアにおける低湿地土壌の分布と特性”、酸性土壌とその農業利用 一特に熱帯における現状と将来一、pp.104 ~ 105、博友社（1984）。
- 10) 梶山文夫、笠原見明：“埋設鋼鉄の微生物腐食と電気化学的挙動”、第38回 腐食防食討論会 C-212、腐食防食協会、pp.243 ~ 246（1991）。
- 11) F. Kajiya, K. Okamura, Y. Koyama, K. Kasahara：“Microbiologically Influenced Corrosion (MIC) of Ductile Iron Pipes in Soils”, *Microbiologically Influenced Corrosion Testing*, Kearns/Little, editors, ASTM Publication Code Number (PCN) 04-012320-27（1994）。
- 12) 岡島秀夫：“第6章 酸性土壌と養分の保持能”、酸性土壌とその農業利用 一特に熱帯における現状と将来一、p.177、博友社（1984）。
- 13) M. Romanoff：“Underground Corrosion”, National Bureau of Standards Circular 579, p.11（1957）。
- 14) 服部 勉：“微生物生態入門”、第2版、東京大学出版会（1995）。
- 15) J. R. Postgate：“Presence of cytochrome in an obligate anaerobe”, *Biochemical Journal*, Nov 14; 56（323rd Meeting）: xi ~ xii（1953）。
- 16) M. Ishimoto, J. Koyama, T. Yagi, M. Shiraki：“Biochemical studies on sulfate-reducing bacteria: VI. Purification of the cytochrome of sulfate-reducing bacteria and its physiological role”, *The Journal of Biochemistry*, Vol.44, Issue 7, pp.413 ~ 423（1957）。

受理日：令和7年3月3日

鉄道設備メンテナンスに多機能鉄道重機を使用開始 ～ロボット技術を活用した高所重作業の生産性、安全性向上～

社会全体として労働力不足が顕在化するなか、鉄道設備のメンテナンスにおける技術・業務革新による生産性、安全性の向上に取り組んでいるところです。

多機能鉄道重機は、高所で人が実施している多様な設備メンテナンスに対応する汎用性の高い作業用機械を目指し、2020 年より株式会社人機一体※、日本信号株式会社とともに開発を進めてきたものですが、2024 年 7 月より JR 西日本グループの西日本電気システム株式会社が営業線での鉄道設備メンテナンスにおいて使用を開始します。

※JR 西日本グループの CVC を担う株式会社 JR 西日本イノベーションズから出資しています。

1. 重機の概要等

(1) 概要

- ・人型ロボット：人に代わって作業を担う
- ・ブーム：人型ロボットの広範囲移動を担う
- ・操縦室：人型ロボット、ブームの操縦装置を装備
- ・鉄道工事用車両：道路と線路の両方を走行可能

(2) 特長

- ・インタラクティブ作用で直感的な操作が可能
- ・多様なツールの装備が可能
- ・遠隔操作で重量物（最大 40kg）の把持、高所作業（最大 12m）が可能

(3) 対象作業

当面は架線支持物の塗装、支障樹木の伐採に使用
(今後もツールの開発を継続し、対象作業を拡充予定)



2. 導入効果

(1) 生産性の向上

作業に要する人手が約 3 割減少

(2) 安全性の向上

作業の機械化により労働災害（墜落・感電）ゼロを目指す

(3) 多様な人財の就業環境の創出

性別や年齢によらず高所での重作業に従事可能

3. スケジュール

2024 年 7 月より使用開始します。

今回ご案内の取り組みは、SDGs 目標の 8 番、9 番に貢献するものと考えています。



JR西日本グループは持続可能な開発目標 (SDGs) を支援しています。

