



埋設管の腐食と防食

鉄管事業部パイプエンジニアリング部
片野幸雄・西崎耕造・岩松潤吉

はじめに

編集 本号では、丘陵を構成する地層中の硫化物を測定するために、いろいろとご協力いただいたのですが、ここでは、埋設管の腐食と防食についてお話ししていただきます。本題に入る前に、最初にダクタイル管について簡単に触れて下さい。

岩松 現在日本では、年間に10,000 km以上に及ぶ水道管の布設工事が行われていますが、そのうちの60%以上は、ダクタイル管が使用されています。このダクタイル管の前身である鑄鉄管は、古くから水道管やガス管などの地下埋設管として広く使用されてきました。ヨーロッパでは、鑄鉄管は1600年代の中ごろから使われ、そのなかには300年以上も水道管として機能を維持している例があります。日本での鑄鉄管は、約100年前に水道管として使用されたのが始まりで、その当時のものでも今なお使われている例があります。

1976年のアムステルダム国際規格委員会の水道部会で各種パイプの事故統計が報告されていますが、それによると、ダクタイル管、鑄鉄管、鋼管、塩化ビニール管、石綿管、ポリエチレン管などのパイプのなかで、ダクタイル管が一番事故の少ないパイプとして報告されています。このようにダクタイル管は、一般的には、非常に信頼性の高いパイプとして広く認められてい

ます。

ところで、埋設管の外面腐食というのは、周りの環境条件によって大きく違ってきます。従来からの常識的な判断としては、石炭がらの埋立地、腐植土、泥炭層、粘土層、それから、海浜地帯などで地下水中に多量の塩分を含む地域、あるいは酸性の工場廃液が流れているような悪質な河川水の浸透している場所——こういったところが一般的に悪いといわれてきました。ただ一昔以前ならば、こうした常識的な判断によってそれなりの対策をたてておれば十分だったのですが、現在では、埋設管の布設規模や密度がまるで違ってきます。その上、布設環境も多様でその条件もきびしくなっていますから、埋設管の腐食しやすい土壌環境というものをより正確に捉える必要ができました。

ANSIによる腐食性土壌の測定・評価法

アメリカでは、1972年に埋設管に対する土壌の腐食性を評価する方法を、国家規格のなかに参考として定めています。それが表1のANSI（注1）による土壌評価法です。この方法は、これからパイプラインを埋めようとする場所の埋設深さ付近の土を、5つの項目について調べます。表にあるように、土壌の比抵抗（比電気抵抗）、pH、酸化還元電位（Redox 電位、Eh）、水分、硫化物です。そして調べられた測定値は、それに該当する点数が表に示されていますから、

その点数を足していった合計点が10点以上になれば、そこは腐食性土壌であるから防食方法を考慮しなさいという評価をします。

このわずか5つの項目で土壌の腐食性が評価できるということは非常に重要なことなんです。だいたい鉄の腐食というのは、必ず電気化学的に起こります。それでまず第1に比抵抗を調べる。比抵抗が低い場合は当然腐食が速く進む、したがって、比抵抗はANSIの表では、700Ω・cm以下では10点をつける。非常に悪いという判断をします。2,000Ω・cm以上になると点数は0で、腐食性が少ないという評価をします。次にpHについては、強酸性の場合は酸溶解によって腐食が進みますから、pHが0～4というのは、非常に悪いという評価をします。中性域では0という点数ですが、ただし、6.5から7.5のところに注があって、硫化物が存在し、酸化還元電位が低い場合には、3点を足す。これはたいへん重要な指摘で、石本先生や小山先生のお話しにありましたように、じつはこれが硫酸塩還元バクテリアの繁殖域にあたっているのです。

次の酸化還元電位（Eh）というのは、これはもちろん土壌が酸化的か還元的であるかを評価する方法で、強還元性の土壌では硫酸塩還元バクテリアが繁殖しますから、点数が多い。Ehがマイナスになれば5点以上という厳しい評価が

表1－ANSI A21.5による土壌評価法

測定項目	測定値	点数
比抵抗(Ω・cm)	<700	10
	700～1000	8
	1000～1200	5
	1200～1500	2
	1500～2000	1
	>2000	0
pH	0～2	5
	2～4	3
	4～6.5	0
	6.5～7.5	0※
	7.5～8.5	0
	>8.5	3
酸化還元電位(Eh) Redox電位(mV)	>100	0
	50～100	3.5
	0～50	4
	<0	5
水分	排水悪く常に湿潤	2
	排水かなり良、一般に湿っている	1
	排水良、一般的に乾燥	0
硫化物	検出	3.5
	痕跡	2
	なし	0

※ 硫化物が存在し、Redox電位が低いときは3点を加算する。
合計点が10点以上のときは、鑄鉄管に対して腐食性であるので防食方法を考慮すること。

表2－腐食速度と環境因子及び因子間の相関係数

変数名	① 腐食 速度	② 土の色	③ Redox 電位	④ 土質	⑤ 硫黄 含有率	⑥ H ₂ O ₂ pH	⑦ ANSI 評価	⑧ KMnO ₄ 消費量	⑨ 現地 比抵抗	⑩ 比抵抗	⑪ 硫化物
①腐食速度	1	0.809	-0.684	0.657	0.613	-0.543	0.538	0.533	-0.384	-0.370	0.360
②土の色		1	-0.698	0.690	0.501	-0.542	0.559	0.500	-0.486	-0.427	0.432
③Redox電位			1	-0.551	-0.458	-0.486	-0.547	-0.493	0.326	0.290	-0.556
④土質				1	0.452	-0.510	0.532	0.369	-0.404	-0.397	0.443
⑤硫黄含有率					1	-0.746	0.742	0.741	-0.504	-0.540	0.365
⑥H ₂ O ₂ pH						1	-0.794	-0.554	0.445	0.373	-0.400
⑦ANSI評価							1	0.596	-0.622	-0.648	0.517
⑧KMnO ₄ 消費量								1	-0.396	-0.392	0.371
⑨現地比抵抗									1	0.656	-0.294
⑩比抵抗										1	-0.179
⑪硫化物											1

●サンプル数 n=71. 相関係数rの有意水準 n=70のとき 危険率5% r=0.235 危険率1% r=0.306
〈注〉⑥H₂O₂により強制酸化後のpH ⑧抽出水のKMnO₄消費量 ⑨実験室にもちこみ土壌箱で測定

注1：ANSI=American National Standards Institute（アメリカ規格協会の略）。
ANSI A21.5=AMERICAN NATIONAL STANDARD for POLYETHYLEN ENCASEMENT

FOR GRAY AND DUCTILE CASTIRON PIPING FOR WATER AND OTHER LIQUIDSに、ポリエチレン被覆による防食法を採用すべきかどうかを決定するための土壌の腐食性評価法が示されている。

与えられます。

また鉄は、水分があれば腐食します。水があることによって鉄は溶解し始める。それで、排水の悪い湿潤状態であれば2点という点数がつきますし、排水のよい乾燥した土壌では腐食しないという評価をします。

最後の硫化物については、硫化物が検出されると腐食性、硫化物がない場合は腐食性でないという評価をします。

比抵抗・pH・硫酸還元菌

以上の5項目なんですが、これをもっとかいつまんでいいますと、埋設管の腐食というのは、比抵抗と、pHと、それから酸化還元電位と硫化物に代表される硫酸塩還元菌の存在、この3つが大きな因子として作用する——このように考えてよいと思います。

さきほども触れましたように、ANSIの評価において、pHが中性でもそこに硫化物があって、酸化還元電位が低いときには3点を足すということは、アメリカでも、この硫酸塩還元菌による腐食というのを非常に重要なファクターとして取り扱っている証拠です。

硫酸塩還元菌による埋設管の腐食の問題は、1934年にオランダの干拓地で、粘土質土壌の中の水道管ではじめて明らかにされました。この腐食は、腐食したパイプの周辺に黒い硫化鉄ができていたというタイプの腐食です。一般に鉄

が腐食して錆びる場合は、水分に触れて酸化され赤い錆びができるのが普通です。それが黒い錆びが発生し、しかも硫化鉄は、パイプ周辺の土壌にも生じていることがわかりました。そこでこの腐食が硫酸塩還元菌によるものだということが指摘され、非常に問題になりました。

硫酸塩還元菌による鉄の腐食の機構については、当時は、硫酸塩還元菌が鉄表面にできるガス状の水素をとりこむことが主な要因と考えられていましたが、その後いろいろな実験や研究がなされ、最近の説としては、硫酸塩還元菌がつくった硫化水素あるいは硫化鉄が、さらに周辺の環境とさまざまな反応し、腐食を促進させていくという説が有力視されてきています。

腐食実態調査とANSI

編集 ANSIの評価法によった場合、日本では埋設管の腐食の実態とよく合致していますか。

片野 フィールドでの実際の調査はいろいろと行なっておりますが、ここでは、関東地方のある造成地とその周辺域の例を解します。この造成地の水道管は、埋設されてすでに10数年たっており、私どもはその腐食の実態と土壌環境を調査しました。調査箇所は70ヶ所余りで、土質は砂からシルトおよび粘土にわたっています。この場合には、ANSIによる評価はもちろん、それ以外にも土質とか土の色などといった環境因子がどの程度腐食と関係しているかというこ

とも調べ、それを相関係数としてだしてみました。それが表2です。そうしますと、この表にみるように土の色というのは意外と相関係数が高く、0.809というように非常に高い値を示しています。表層を削った新鮮な土の色が青灰色を示した場合には、まず腐食性土壌と考えて間違いなさそうです。問題のANSIの評価は0.58という相関係数で優に有意水準をこえており、統計的に相関関係が深いということになります。図1は、腐食速度と土の色・土質・ANSIの評価などとの関係を表わしたものです。これでみますと注目すべきことは、腐食速度の大きいところはすべてANSIの土壌評価で10点をこえています。逆に評価点数が10点以下の低い点数のところでは問題となるような腐食速度になっておりません。ですからANSIの評価法は、腐食の危険性を予知するという意味では大変に適確な方法であると思われます。ただし、ANSIの評価で10点をこえているところでは、そのすべてが腐食速度が大きいかというところではないケースもあります。

それからもう一つ、給水地域全域にわたる調査では、大阪市水道局が行なったものがあります。これは、水道管の腐食状況と埋設環境との関係や、腐食性土壌の分布状況を見るために、昭和52年から昭和56年にかけて、市内一円にわたる220ヵ所の水道管を調査したものです。この調

図1 A—腐食速度と土の色

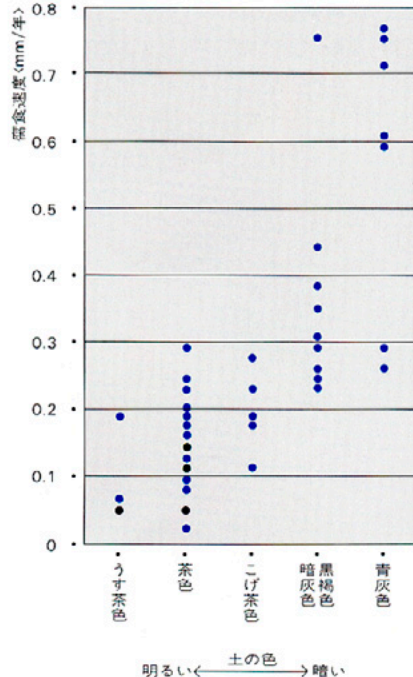


図1 B—腐食速度と土質

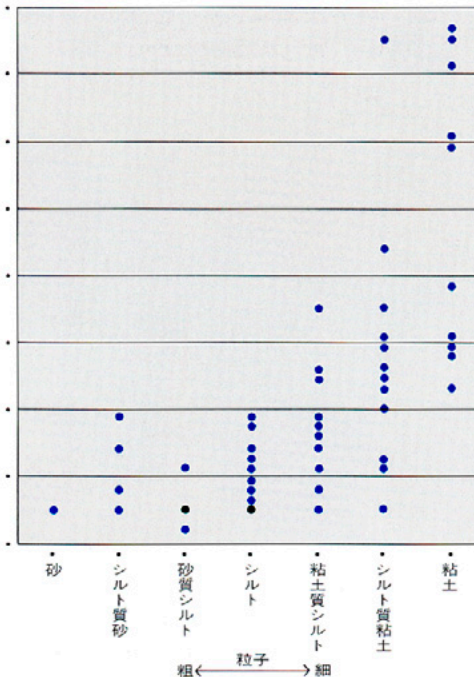
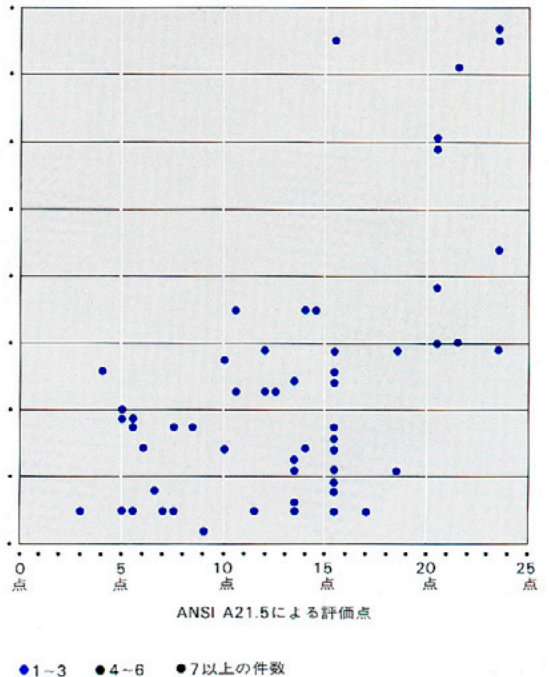


図1 C—腐食速度とANSI評価点



査をもとに、大阪市は水道管にポリエチレンスリーブ法による防食対策を適用する区域をきめたのですが、それが図2です。ところがこの図をみて私どもは大変に驚いたのですが、その図は本誌のNo. 16号に紹介されていた梶山・市原両先生の描かれた大阪平野の古地理図(図3)と殆んど同じなんです。つまり、縄文時代に海であった地域——沖積の海成粘土がつもった地域が主として対象になっているのです。

海成粘土とANSI

岩松 いまの大阪市の話は沖積の海成粘土ですが、丘陵地などの海成粘土をANSIの評価法で採点しますと、どこのものでも非常に高い点数になります。図4は、私どもがこれまでに工事現場などでしばしば経験するごく代表的な土壌をANSIで評価したものです。ANSIで採点しますと、だいたい海成粘土——とくに未風化の海成粘土は、まず比抵抗は $1,000\Omega\cdot\text{cm}$ 以下で8~10点、硫化物が検出されるので3.5点、Ehは3.5~5点、粘土質のため水分が多いので2点さらにpHが中性で硫化物がありEhが低い場合が多いので3点追加されます。こうして20点ぐらいになります。ですからANSIの評価では、海成粘土は腐食性の最も強い土ということになります。今回、各先生方のご指導のもとに、各地の丘陵の地層を調査することができましたが、その表(裏表紙裏面および35pに収載<編>)

の測定値をみても、海成粘土は非常に高い点数になります。(ただしEhの測定値は、いずれも採取後3~4日経過した後の値であるため、現場での測定よりは高くなっている可能性があります)。

編集 海成粘土であるかどうかは、工事現場などでは簡単にたしかめられますか。

岩松 市原先生のお話しにありましたように、粘土をその堆積環境から大別すると、海成粘土と淡水成粘土とがあります。その粘土が風化したものであれば、海成粘土の方は独特の割れ方をしますから私どもでも、その場で判別できます。ところがそれが未風化の場合には、両方とも同じように青みがかった色をしており、その場では、とても判別できません。だからといって、その粘土の分析結果がわかるまで工事を中断させることもできません。

そこで私どもでは、海成粘土には硫化物が多く含まれ、淡水成粘土にはそれが殆んどないということ、さらに海成粘土を酸化すると強酸性になるということから、強力な酸化剤を使ってこれを見分けております。その酸化剤としては過酸化水素を用いるのですが、現場で採取した粘土を、小指の先ほどですがぼつんと入れます。そうしますと、速いときには3分ぐらい、遅くとも10分ほどの間に、その場で急激にその土は酸化されて、硫化物は硫酸という形になります。

したがって、酸化し終わった後、pH試験紙でその液のpHを見ると、海成粘土はpHが1から2ぐらいになります。海成粘土でないほかの土ですと、pHはそんなに下がりにません。このようにして海成粘土を現場で簡単に見つけております。じつは、この方法は本誌No. 11号の市原先生の論文から貴重なご教示を得たものなのです。

なお、さきほどちょっと触れました丘陵地の調査では、ANSIによるもの以外に私ども独自の調査法として、土壌の抽出水中の硫酸塩とか塩素イオンも分析しております。これは土を持って帰りまして、実験室で、重量1の土に対し2.5倍の純水を入れ、一昼夜攪拌します。攪拌をしますと、硫化物は当然酸化されながら硫酸塩になります。その硫酸塩のイオンが溶けてできた水を分析する。つまり、土の中の塩分をしばらく出してみるわけです。そうしますと、海成粘土はもちろん硫化物が多いのでそれが酸化されて抽出水の分析では、硫酸塩がたくさん出てまいります。さきの表をご覧くださいばお判りのように、海成粘土の場合には数100ppmというオーダーで硫酸塩がでてまいります。この抽出水については、その蒸発残留物についても調べています。この蒸発残留物は硫酸イオンがほとんどで、過去のデータをみても蒸発残留物と硫酸イオンとは相関が0.9ぐらいにもなります。

図2—ポリエチレンスリーブ法の適用地域(大阪市)

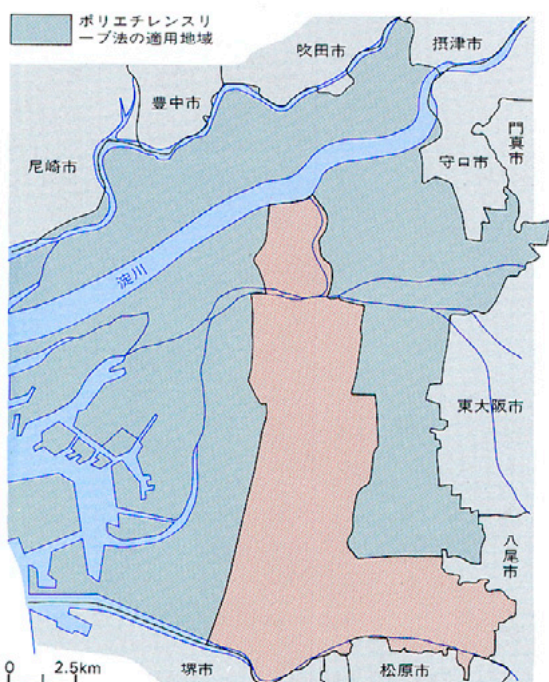


図3—大阪平野の古地理図

(梶山・市原)

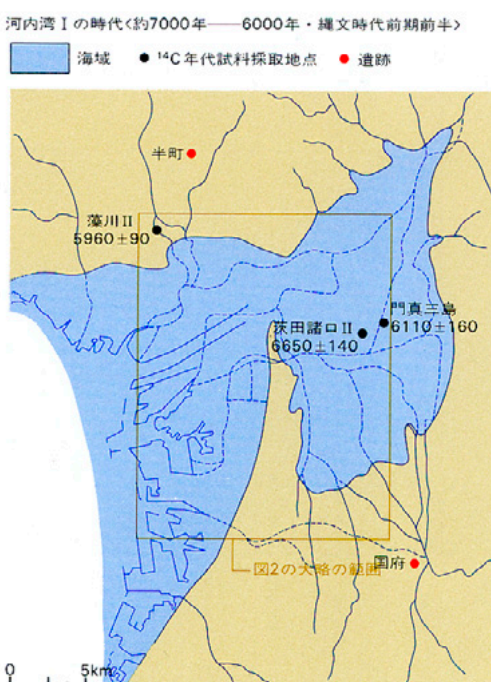
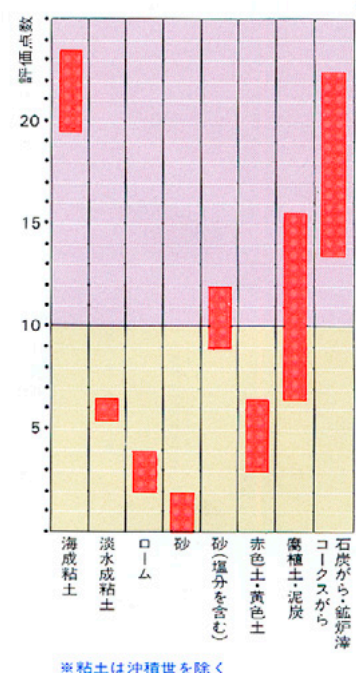


図4—ANSI A21.5による土壌の腐食性評価



比抵抗もこのイオンとの関係が非常に強いという結果が出ております。

そのほか、土の色とか土質などはもちろん調べております。さきの図にもありましたように、とくに土の色というのは腐食性との相関が非常に高いので、腐食性を判断するための有効な指標になります。

埋設管の防食－ポリエチレンスリーブ法

編集 海成粘土のような腐食性の強い土の場合、防食方法はどのようにしていますか。

岩松 私どもは、ポリエチレンスリーブ法を採用しております（注2）。この方法は、アメリカで20数年前に開発されたもので、その特徴は、埋設管の布設現場で約0.2mm厚のポリエチレンの袋を、ちょうどくつ下をはかすように管の全長にわたって被覆するものです。この場合、ポリエチレンスリーブは管とは密着していませんが、ポリエチレンのフィルムによって管本体が周囲の土壌と直接接するのを防ぎます。このことが、地下埋設管の腐食の大きな原因である、周辺環境のさまざまな条件の違いからおこる濃淡電池の発生を防ぐ役目をします。密着していませんから、地下水はポリエチレンスリーブと管との間に入ってきますが、その水は自由に動くことができないから、少しは腐食しますが、それによって酸素がなくなってしまい、電気化学的にも均一な状態がつかれ、その後

の腐食反応が抑制されるという効果をもつことになります。

海成粘土による埋設管の防食実験

では、このようなポリエチレンスリーブ法が、海成粘土に対してどのような効果があるかということをおもは実験をしてみました。埋設実験場は、大阪層群の海成粘土を客土してつくったのですが、そのさい風化して酸性になった海成粘土と、未風化の海成粘土に分けてみました。さらに未風化の海成粘土と山砂を30：70の割合で混合した混合土壌、それからもう一つ比較する意味で山砂、この4つの土壌を用いた実験場をつくりました。埋設管は直径 75 × 長さ450mmのダクトイル管で、全く塗装しないもの、通常の塗装を行なったもの、ポリエチレンスリーブをかぶせたものなど、各種のものをそろえました。

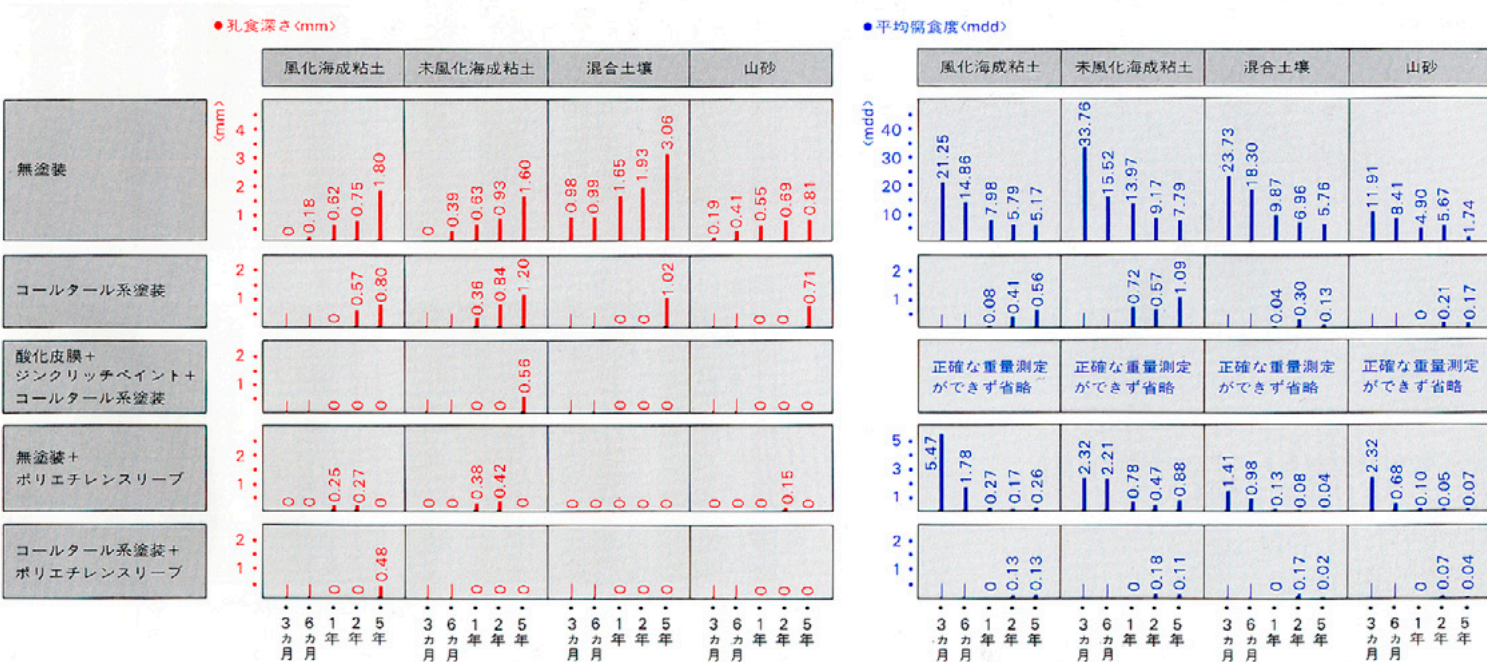
こうして3ヵ月から順次5年間まで、それぞれの腐食状況を測定してみたのですが、その結果が図5です。そうしますと、もちろん無塗装の場合が一番腐食が激しいのですが、特徴的なことは混合土壌が非常に大きな腐食を示したことです。これは、混合土壌は他の均質な土壌にくらべ、土壌において濃淡電池を形成しやすく、それが腐食の進行を加速させているのではないかと考えられます。この点は、造成地や埋立地などの盛土の問題とも関連するので、

今後も注意すべきことだと思います。

さて、かんじんのポリエチレンスリーブをかぶせたものについてみますと、これは5年たっても孔食深さはどの土壌においても誤差の範囲でしか生じておりません。もちろん、平均腐食度（mdd＝mg/dm²/day）はあります。この平均腐食度というのは、試験期間が終わったあと、試験後の管の重量を測定し、その重量減を一定面積につき1日あたりで換算した平均の腐食度なんです。ポリエチレンスリーブの中には水が入りますから、当然、その分によるさびが発生します。パイプラインでは局部腐食が問題なんです。それがポリエチレンスリーブをかぶせると殆ど起こっておりません。

西崎 ポリエチレンスリーブ法については、もう一つ、地下水位の動きと関連してどのような防食効果が発揮されるかをみる実験も行なっています。というのは、自然状態では地下水位はいつも一定ではなくて、時期によって上下しています。ですから、こうした水の動きと関連させたテストをしてみたわけです。そのために試験槽に試験片を入れ、図6に示すように、一つは常時水につけた場合、もう一つは6時間おきに水を入れたり抜いたりを繰り返してテストしたのです。そのさいこの水には、海成粘土の性状に合わせるために、5%の硫酸鉄と、それからもう一つ、ちょっと極端ですが3%の硫酸液

図5－海成粘土による埋設試験結果



注1●孔食深さは、比較的大きい孔食深さを5ヵ所測定し、その最大値を表示した。注2●線部は、目視の段階で腐食が少なかったため測定せず。

で試験したんです。その結果が表3です。もちろん5%の硫酸鉄よりも、3%の硫酸の方が非常に激しい腐食を起こしました。たとえば、全く塗装してない試験片の場合、硫酸の場合はもう半分鉄がなくなってしまって、ものすごい量の腐食を起こしました。しかしポリエチレンスリーブをかぶせたものについては、そこには局部的な腐食はほとんど生じていないことが確認されました。なお、写真にありますように、コールタール塗装やタールエポキシ塗装をしたものは、その塗装に傷をつけた部分に貫通するような腐食が起きました。こうしたテストによってもポリエチレンスリーブ法による防食が現実的で安全な防食方法であるということがわかりました。

アメリカにおける防食実験例から

岩松 また実際に、埋設環境条件の悪い埋立地などで、この防食法を施した埋設管の腐食状況を私どもは調べております。そうしますと、7年あるいは10年経過したものでも腐食は殆んど認められず、この方法による防食効果が大変安定したものであることを確認しているのですが、ここでは、最後にもう一つ、外国での実験研究の例を簡単に紹介します。というのは、それが硫酸塩還元菌の問題とも関連させながら、このポリエチレンスリーブ法の防食効果について報

告しているからです。

それは、アメリカのカンサス大学のDr. John O. Harris氏が「The Efficiency of the Polyethylene Sleeve over Cast Iron Pipe in Relation to Sulfate Reducing Bacteria」というレポートにまとめているものです。その中で紹介されているものの一つは、ネバダ州のオーバートーンの事例です。この土壌は、比抵抗が200 $\Omega \cdot \text{cm}$ 、硫化物は多く検出、Redox電位は+100 mV（ただし48時間後の実験室での測定）、pHは7.6ということですから、当然このバクテリアが繁殖しております。そこでの試験の結果では、パイプは腐食していなかったと報告されています。

もう一つはフロリダ州の実験で、この土壌は比抵抗が364 $\Omega \cdot \text{cm}$ 、Redox電位が-410 mV、硫化物は多く検出、pHは6.8~7.0、というところで、普通のパイプは4年間で6.4 mmの深さの孔食が起ったという事例があったところです。そこでポリエチレンスリーブをかぶせて9年間埋設したものを調べたのですが、この場合にも、パイプにはほとんど腐食がなかったということを確認しております。そのほか、カリフォルニアのサンジェゴでも同様な土壌条件のところで実験をしており、この場合には、12年間埋めて、腐食は認められなかったという報告が

なされています。そして、これらそれぞれのケースについて、硫酸還元菌をはじめ他のバクテリアの棲息数などが調べられております。こうした実験例をもとに、Dr. John O. Harris氏は、ポリエチレンスリーブ法では、何故腐食が進まないかという点について、2つの理由を挙げています。その一つは、ポリエチレンスリーブで被覆しておれば、硫酸塩や有機物などの、いわゆるバクテリアの栄養源となる物質の出入りがなくなってしまう。そのために、バクテリアがパイプの表面では繁殖しにくい。もう一つは、ポリエチレンスリーブと金属の間に入った水の膜が均一な電氣的表面状態をつくり、腐食促進の元凶となるいわゆる濃淡電池が発生しにくい状況をつくり出してしまふ。以上の2点を強調しております。

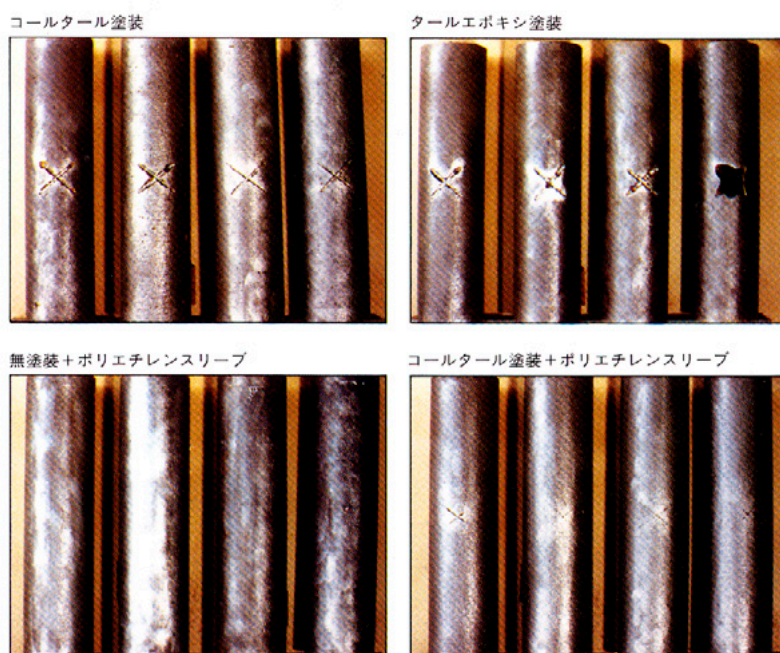
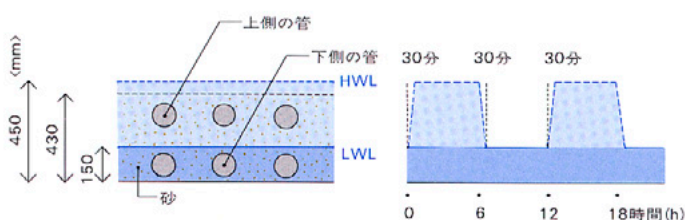
以上のような次第で、ポリエチレンスリーブによる防食法は非常に安定した効果をあげております。現在、ポリエチレンスリーブ法は、鑄鉄管の防食法としてアメリカ（ANSI A21.5）およびイギリス（BS 6076）の国家規格として制定されています。また1984年中には、国際規格（ISO 8180-1984）として制定されるはこびとなっています。

表3－埋設試験結果

	5%硫酸鉄溶液 3%硫酸			
	常時水位下		水位変動内	
	重量減 (mdd)	孔食深さ (mm)	重量減 (mdd)	孔食深さ (mm)
無塗装	207.1 2300	1.03 4.5	35.3 2500	0 5.0
コールタール系塗装	41	3.5	0 51	0 3.7
タールエポキシ塗装	※	4.3	※	5.2
無塗装 + ポリエチレンスリーブ	3.6 15	0 0.8	0 20	0 0.8
コールタール系塗装 + ポリエチレンスリーブ	1.2	0.8	1.9	0.6

※印は測定不可能。横線部は測定しなかったことを示す。

図6－管の埋設位置および液面の変動サイクル



注：いずれの写真も3%硫酸でのテストで、左2本が常時水位下、右2本が水位変動内