

鋼製パイプラインが受けるC/Sマクロセル腐食の影響評価に関する実証的研究

伊藤久也¹・鈴木哲也²・河野英一³・青木正雄⁴

¹正会員 株式会社日本水工コンサルタント 名古屋事務所 技術部(〒453-0016 名古屋市中村区竹橋町5-10)

²正会員 博士(工学) 日本大学専任講師 生物資源科学部 生物環境工学科(〒252-8510 藤沢市亀井野1866)

³正会員 農博 日本大学教授 生物資源科学部 生物環境工学科(〒252-8510 藤沢市亀井野1866)

⁴正会員 博士(農学) 日本大学准教授 生物資源科学部 生物環境工学科(〒252-8510 藤沢市亀井野1866)

ライフライン施設の中でも農業用水のパイプライン施設は、上水道等に比べ規模が大きく損傷等による事故が発生した場合、甚大な事故に至る可能性が高く施設の維持管理上、腐食損傷の度合も評価する必要がある。特に埋設された環境下での鋼製パイプラインは、埋設土壌とコンクリート構造物との電位差(管対地電位)の関係からC/Sマクロセルによる損傷が顕著に現れる傾向にある。本研究は、建設後わずか10年未満で腐食が顕在化した鋼製パイプラインを対象に、管対地電位を測定し、測定値より腐食の発生特性を考察したものである。この結果、鋼製パイプラインの損傷度合を電位指標により評価し、管対地電位と腐食速度及び漏水事故との間に密接な関係があることが明らかとなった。

キーワード : マクロセル腐食, パイプライン, 管対地電位, 土壌抵抗率, 漏水事故

1. はじめに

上下水道や産業用水に代表されるパイプラインは、路線のほぼ全体が地中に埋設され、維持管理が容易な状態には無い。これらの施設は、管材自体の経年の劣化に加えて、外的要因がもたらす破損・腐食により管材の損傷が進行する。この損傷に伴う破裂・漏水事故により道路及び他の地下埋設物を損傷させたり、家屋などへの浸水・損傷、道路陥没といった事故が多発している。場合によっては、車両事故や人身事故に至る二次的災害を誘発する恐れもある。特に、農業用水施設のパイプラインは、上下水道に比べて施設規模が大きいため漏水による被害も規模が大きく、漏水の有無、漏水位置の特定および損傷要因の特定はパイプラインの維持管理という観点から重要である。パイプラインの腐食損傷は、埋設環境が大きな外的要因になっているといわれている¹⁾。筆者らは、このような現状を踏まえて腐食損傷に関する実態調査²⁾を実施するとともにAE(Acoustic Emission)法を用いてパイプラインの非破壊モニタリング法による漏水の有無・位置特定技術を開発している^{3),4),5)}。

本研究では、これらの成果に加え、パイプライン

の維持管理対策を考える上で重要な埋設環境が関わる腐食要因について一考察を行ったものである。研究対象地区では、耐用年数を大幅に下回る施工後10年未満でパイプライン本管の腐食が進行している鋼製パイプライン(以下、パイプラインと称す)を対象に、コンクリートと土壌の電位差がもたらすコンクリート/土壌系マクロセル腐食(以下、C/Sマクロセル腐食と称す)の発生特性評価を非破壊かつ非掘削により試みた。以下に、その成果を論述する。

2. マクロセル腐食メカニズムとパイプラインへの影響

地下に埋設されている鋼管やダクタイル鋳鉄管の腐食のメカニズムは、地下の土壌環境や管の種類と配管状況によって異なる。これらの管の素材となっている鉄は、酸化物や硫化物等の鉱石として化学的に安定して存在していたものを、人工的に還元して製造されたものである。これらが土壌環境に置かれると、最も安定した酸化鉄の状態へと反応する。この現象が腐食であり、その種類は大別して、腐食化のメカニズムにより自然腐食(ミクロセル腐食・マ

クロセル腐食)と電食に分類される⁶⁾。

電食は、電鉄や電気防食施設のような電気設備から直流電流が漏洩したものが要因となる迷走電流によるものと外部電源方式の電食防食を行ったとき他の鋼管に電気的影響をおよぼす干渉による腐食によるものがある。

(1) ミクロセル腐食

水や土壌などの電解質に接している鋼管の表面には、塗装の有無、原管の組織、埋設環境などのわずかな違いにより微視的なカソード（プラス極）とアノード（マイナス極）が形成され、それらから成る局部電池（ミクロセル）が多数存在している。この局部電池による腐食をミクロセル腐食といい、比較的穏やかで均一かつ全面的な腐食が引き起こされる。これは、刻々と管の表面の状況が変わるため、それに伴ってアノード ($\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$) とカソード ($2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$:酸性, $1/2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^-$:中性・アルカリ) が移動し、新たな局部電池の形成部位において鉄イオンの溶出が進行していくためである。

(2) マクロセル腐食

マクロセル腐食は、電位差の異なる箇所が、ある距離において固定化している場合に起こる腐食であり、アノードとなる箇所が集中的に腐食する。その腐食速度は $0.1 \sim 2.0\text{mm/年}$ ⁷⁾と大きく、鋼管の耐用年数を大幅に下回って数年で漏水事故がもたらされる。マクロセル腐食の区分とマクロセル腐食を起こしやすい主な環境は以下のとおりである。

a) コンクリート/土壌系腐食

コンクリート中に設置された鋼管の自然電位は通常の土壌に比べて概ね $0.2 \sim 0.3\text{V}$ 高となる⁷⁾。このため、土壌とコンクリートとを跨って鋼管が配管されている場合には、コンクリート/土壌境界部で、土壌中の鋼管部分がアノード、コンクリート中の鋼管部分がカソードとなるマクロセルが形成され、土壌側の境界部付近を中心に鋼管の腐食が促進される(図-1)。これが、C/Sマクロセル腐食(写真-1)である。さらに、コンクリート中の鉄筋が、そこに設置された鋼管と同じ自然電位になることから、両者が電氣的に接触しカソード部の面積が大きくなり、土壌側の鋼管部分(アノード)の腐食が一層促進される。

b) 通気差腐食

通気差マクロセル腐食は、通気がよく酸素量の多い土壌中の鋼管部分がカソード、通気が悪く酸素量の少ない土壌中の鋼管部分がアノードとなって電池を形成しアノードの鋼管部分で進行する腐食である。

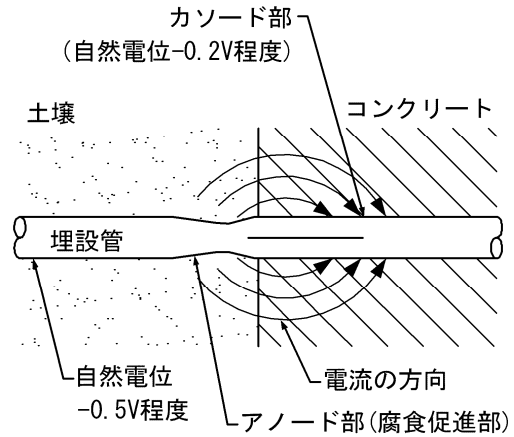


図-1 C/S マクロセル腐食の機構



写真-1 C/S マクロセル腐食状況

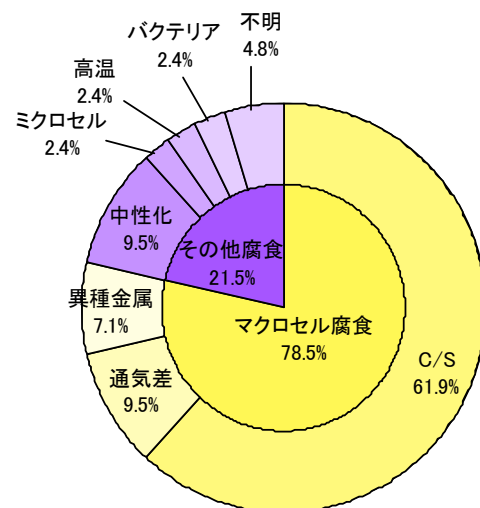


図-2 埋設管腐食実態⁸⁾

表-1 地区別概要

	H地区	M地区
施工期間 (年数)	S50年～H1年 (14年)	S49年～H9年 (23年)
受益面積	2427(ha)	5145(ha)
付帯施設全数	133施設	251施設
調査対象施設	83施設	90施設
別途調査済施設	50施設	85施設
その他施設	—	調査外61 欠測他15

c) 異種金属接触腐食

異種金属接触腐食は、異なる種類の金属材料が電氣的に接触し相互に影響し合って生じる腐食現象である。金属材料が腐食しやすいかどうかは、金属材料がもつ自然電位差の順位による。自然電位差の低い金属材料がアノードとなり進行する腐食である。

(3) マクロセル腐食の実態

マクロセル腐食を含む埋設管路への腐食による影響実態について1979年～1984年の5年間に公表された42件の事例⁸⁾を図-2にまとめた。この結果、全体の61.9%がC/Sマクロセル腐食であり、通気差腐食及び異種金属接触腐食を含むと全体の78.5%に上る腐食事例がマクロセル腐食によるものである事が明確になる。このことから埋設管路に対するマクロセル腐食が及ぼす影響が多大であることが伺える。

3. 調査対象地区概要

(1) 調査対象地区

調査対象地区は、S県H地区及びM地区である。この2地区はS県を代表する丘陵地及び台地でありH地区では丘陵地の斜面およびそれに続く洪積台地に位置し、みかんの生産を中心とする樹園地農業地帯である。一方、M地区は台地を中心として中山間地に広がる茶園の生産を中心とした地区である。いずれの農産物もS県を代表する生産物であり平成19年度の統計では、茶が全国1位、みかんが全国2位の出荷額となっており日本国内でも有数の農産地である。

(2) 調査対象

調査対象のパイプライン（表-1）の内、H地区は受益面積2,427haの果樹園に多目的利用の畑地かんがい施設として建設され、昭和50年に着工、平成元年に完工された。幹線水路となっているパイプライン



写真-2 計測施設での漏水

は延長L=55.1km(この内、調査対象L=32.1km)である。M地区は、受益面積5,145haの畑地を中心とした畑地かんがい施設として建設され、昭和49年に着工、平成9年に完工された。幹線水路となっているパイプラインは延長L=78.1km(この内、調査対象L=38.9km)である。本研究では、基幹水利施設である幹線パイプライン及びそれに付帯する施設(H地区83箇所、M地区90箇所)を対象とした。

パイプラインとその付帯施設では、建設後20年程が経過し、現在までにH地区で33件、M地区では5件の漏水事故が発生している（写真-2）。これらの事故発生の時期として短期間の箇所では、完工後わずか10年未満で鋼管部分にC/Sマクロセル腐食が確認され、早期損傷が懸念されている。

尚、M地区では、他地区の調査結果より簡易なコンクリート二次製品を使用した側塊構造の施設（61施設）は、C/Sマクロセル腐食発生の可能性が極めて少ないことから調査対象外としている。

4. 調査の項目と方法

本研究では、調査対象のパイプラインの内、幹線水路に付帯する全施設（2地区合計173箇所）について、施設近傍の鋼管部における漏水事故の主因と考えられているC/Sマクロセル腐食状況を定量的に評価するため、判定に必要な土壌抵抗率、管対地電位および電氣的導通特性の3項目を計測した。

調査対象のパイプラインに付帯する施設（以後、付帯施設と称す）の種類は、空気弁工、分土工、排泥工、制水弁工および流量計工ほか等である。

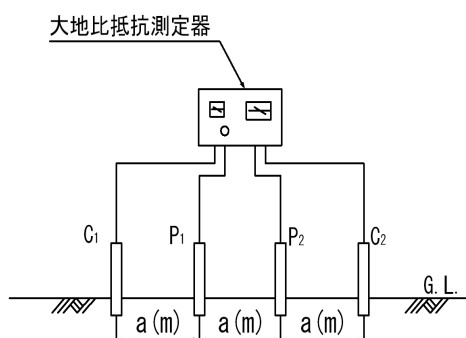


図-3 土壤抵抗率測定（4極法）

表-2 土壤抵抗率

腐食性	土壤抵抗率 ($\Omega \cdot m$)
激しい	0~10
やや激しい	10~50
中	50~100
小	100~1000
極めて小	>1000

と腐食性の関係は既往の研究により提案されており、本研究では、表-2に示す基準値⁹⁾を採用した。

(2) 管対地電位測定

管対地電位測定は、高感度電圧記録計（型式:EPR-1FA型、製造:東亜電波工業）および飽和硫酸銅照合電極を用いた（図-4）。これらの機器により、照合電極を高感度電圧記録計のマイナス端子に接続し、鋼管に設置した測定用リード線をプラス端子に接続して両極間の電位差を測定した。また、電位差としては、照合電極を施設のコンクリート壁部から0.5m、1.0m、2.0m、3.0m以降1.0m間隔でパイプライン直上部の土壤表面を移設して、各地点におけるものを測定した。

管対地電位によるC/Sマクロセルの判定は、管対地電位がコンクリート構造物近傍において-400 mVより大きい場合に、コンクリート中の鋼管と鉄筋とが電氣的に導通しており、腐食の発生をもたらすC/Sマクロセル形成の可能性があると判定した¹⁰⁾。

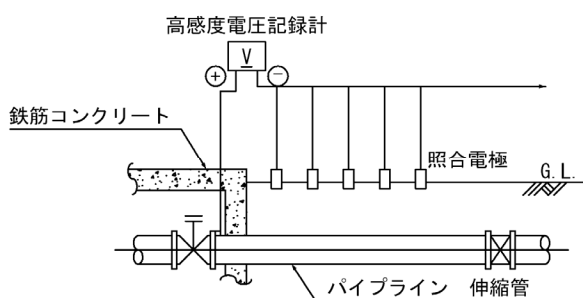


図-4 管対地電位測定

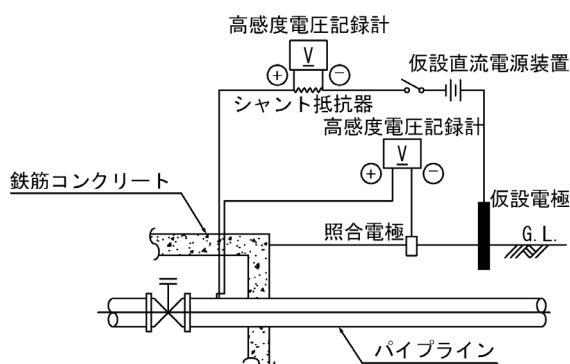


図-5 電氣的導通特性測定

(1) 土壤抵抗率測定

土壤抵抗率測定は、大地比抵抗測定器（型式:3244型、製造:横河電機）を用いた。この測定器により、対象となる施設の地表面上で、一直線に4本の電極（接地極C1、補助接地電極P1、電位電極P2、電流電極C2の順）を間隔aで均等に配置し、P1とP2の間の電位差をC1とC2の間で流れた電流で割った抵抗値R (Ω) を計測した（図-3）。

土壤抵抗率の判定は、土壤自身の腐食性の判定の目安になる指標であり、主に土壤の含水量と塩類濃度に左右され、C/Sマクロセル腐食の発生電流の大きさと腐食速度に関係する指標となる。土壤抵抗率

(3) 電氣的導通特性測定

電氣的導通特性の測定には、管対地電位測定と同様の高感度電圧記録計および飽和硫酸銅照合電極、これらに加えてシャント抵抗器、仮設電極および仮設直流電源装置を用いて仮通電試験として実施した（図-5）。この機器により、管路、シャント抵抗器、高感度電圧記録計、仮設直流電源装置および仮設電極からなる直流の電気回路を形成した。この電気回路により、パイプライン外表面をマイナス極、仮設電極をプラス極として土壤を介し仮設直流電源装置によりON-OFF操作を一定間隔で繰り返しながら通電して、通電電流の大きさを測定した。

電氣的導通特性は、コンクリート中の鋼管と鉄筋との導通の有無を判定するものであり、鋼管に外部から電流を流した場合に、コンクリート中の鋼管と鉄筋とが接触していない状態では、小さい電流値であっても仮設電極から土壤中を経て鋼管に導通し電位がマイナス側へ大きく変化する。電流値は鋼管表面積 $1m^2$ 当りに必要な電流（所要防食電流密度）として表示する。電氣的導通特性より、所要防食電流

表-3 土壤抵抗率結果一覧

施設名称		空気弁工	分水工	排泥工	制水弁工	流量計工ほか	全施設
H地区	施設数(箇所)	30	26	14	10	3	83
	最大値($\Omega \cdot m$)	867	867	829	816	345	867
	最小値($\Omega \cdot m$)	40	32	119	50	44	32
	平均値($\Omega \cdot m$)	255	280	362	310	205	286
	0-10($\Omega \cdot m$)	0	0	0	0	0	0(0%)
	10-50($\Omega \cdot m$)	3	3	0	0	1	7(8%)
	50-100($\Omega \cdot m$)	6	2	13	1	0	10(12%)
M地区	施設数(箇所)	27	35	4	12	12	90
	最大値($\Omega \cdot m$)	628	679	641	804	365	804
	最小値($\Omega \cdot m$)	76	23	43	28	48	23
	平均値($\Omega \cdot m$)	246	229	311	220	219	235
	0-10($\Omega \cdot m$)	0	0	0	0	0	0(0%)
	10-50($\Omega \cdot m$)	0	4	1	3	0	8(9%)
	50-100($\Omega \cdot m$)	2	3	0	2	2	9(10%)
土壌抵抗率分布(箇所)	100-1000($\Omega \cdot m$)	21	21	13	9	2	66(80%)
	1000以上($\Omega \cdot m$)	0	0	0	0	0	0(0%)

密度が $0.01A/m^2$ 未満の場合に、コンクリート中の鋼管と鉄筋との電気的導通がないと判定¹⁰⁾され、C/Sマクロセル腐食の可能性はないとした。

5. 調査結果および考察

(1) 付帯施設周辺の電気的特性

a) 土壌抵抗率特性

パイプラインに付帯する施設近傍の土壌抵抗率をH地区とM地区に区分し表-3に示す。

H地区では、全数の83箇所が $10 \sim 1000 \Omega \cdot m$ の範囲に分布しており、全体の80%が $100 \sim 1000 \Omega \cdot m$ の範囲にある。このほか、 $50 \sim 100 \Omega \cdot m$ の範囲にあるものが全体の12%を占めており、残りの8%が $10 \sim 50 \Omega \cdot m$ の範囲に分布している。計測値の最大値は $867 \Omega \cdot m$ であり、最小値は $32 \Omega \cdot m$ を示している。付帯施設近傍の土壌の80%が該当する土壌抵抗率 $100 \sim 1000 \Omega \cdot m$ は、表-2の基準によれば、腐食性が「小」として判定される範囲であり、土壌がパイプラインに及ぼす腐食性が小さいと考えられる。

M地区では、全数の90箇所がH地区と同様 $10 \sim 1000 \Omega \cdot m$ の範囲に分布しており、全体の81%が $100 \sim 1000 \Omega \cdot m$ の範囲にある。このほか、 $50 \sim 100 \Omega \cdot m$ の範囲にあるものが全体の10%を占めており、残りの9%が $10 \sim 50 \Omega \cdot m$ の範囲に分布している。計測値の最大値は $804 \Omega \cdot m$ であり、最小値は $23 \Omega \cdot m$ であり、いずれもH地区とほぼ同様の値を示す結果となった。したがって、M地区においても土壌の81%が該当する土壌抵抗率 $100 \sim 1000 \Omega \cdot m$ は、H地区同様（表-

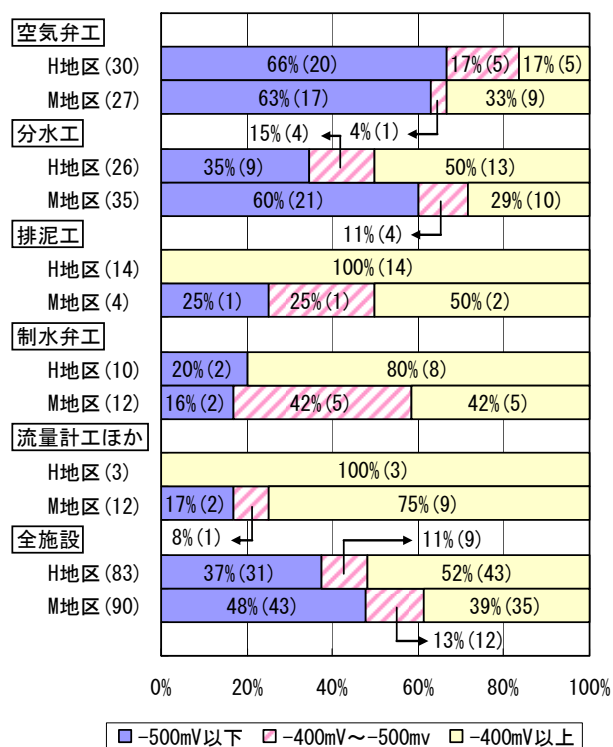


図-6 管対地電位特性

2) 腐食性が「小」として判定される範囲であり、土壌がパイプラインに及ぼす腐食性が小さい。

以上のことから、土壌抵抗率においては、2地区ともに、ほぼ同様の傾向を示し、地区別の差異は認められない。それぞれの地区の約80%が該当する土壌抵抗率 $100 \sim 1000 \Omega \cdot m$ は、腐食性が「小」として判定される範囲であり、調査対象である2地区ともに分布する多くの土壌はパイプラインに及ぼす腐食性が小さいといえる。

b) 管対地電位特性

調査対象の2地区について管対地電位測定の結果を取りまとめたものが図-6である。

H地区では、C/Sマクロセルが形成される $-400mV$ 以上の値を示した付帯施設が全体の52%を占めた。付帯施設別では、分水工で50%、制水弁工で80%、排泥工および流量計工ほかでは100%の施設がC/Sマクロセルが形成される $-400mV$ 以上の値を示した。しかし、空気弁工では、 $-400mV$ 以上の値を示すものが17%と低い割合を示しており、他の付帯施設と比べて施設構造上の違いからC/Sマクロセルが形成されにくい状態にあると考えられる。H地区では空気弁工を除く53施設を全体の割合で見ると、その約72%と多くのものが $-400mV$ 以上の値を示しており、鉄筋コンクリート構造となっている施設では、C/Sマクロセルが形成されやすい状態にあるといえる。

M地区では、C/Sマクロセルが形成される $-400mV$

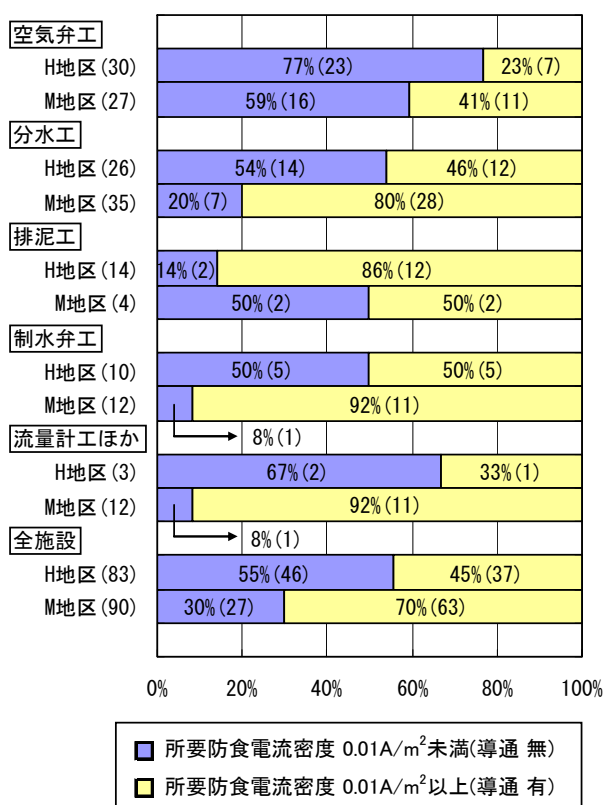


図-7 電氣的導通性

以上の値を示した付帯施設は、全体の39%に留まっている。施設別では、分水工で29%、排泥工で50%、制水弁工で42%、流量計工ほかでは75%がC/Sマクロセルが形成される-400mV以上の値を示した。また、H地区では17%と低い割合となっている空気弁工を見ると、M地区では33%となっておりH地区に比べ-400mV以上の値を示す割合が高い傾向にあることが分る。これは、M地区では表-1にあるように、調査に当たり空気弁工のうち簡易なコンクリート二次製品を使用した側塊構造の施設（61施設）を調査対象から外した事が影響を与えているものと推測される。この調査外とした61施設を当該調査数量に加え、これらが-400mV以下の値を示すものとした場合、空気弁工で-400mV以上の値を示す割合は、約10%程度となりH地区と同様、他の付帯施設と比べて施設構造上の違いからC/Sマクロセルが形成されにくい付帯施設であるといえる。

c) 電氣的導通特性

調査対象地区の電氣的導通特性を仮通電試験の結果から所要防食電流密度を算出し、取りまとめたものが図-7である。

H地区では、付帯施設全体の45%において、コンクリート中の鉄筋と鋼管本体とが接触していると見られる値である0.01A/m²以上を示している。また、

表-4 施設別 C/S マクロセル腐食発生の有無

施設名称		空気弁工	分水工	排泥工	制水弁工	流量計工ほか	全施設
2地区施設数 (箇所)		57	61	18	22	15	173
H地区	C/S有 (箇所)	7	23	14	10	3	57
	C/S無 (箇所)	23	3	0	0	0	26
M地区	C/S有 (箇所)	10	28	3	8	9	58
	C/S無 (箇所)	17	7	1	4	3	32

0.01A/m²以上を示す付帯施設別の割合としては、分水工で46%、排泥工で86%、制水弁工で50%と大きく、特に排泥工では大半の施設でコンクリート中の鉄筋と鋼管本体とが接触しているといえる。これらの施設は、保護工が鉄筋コンクリート構造となっており、構造的な要因が大きく影響しているものと考えられる。空気弁工では全体の23%と少なく、ほかの付帯施設と比べてコンクリート中の鉄筋と管本体が接触しにくい状態にあるといえる。

M地区では、施設全体の70%の施設において、コンクリート中の鉄筋とパイプライン本体とが接触していると見られる値である0.01A/m²以上を示している。また、0.01A/m²以上を示す付帯施設別の割合としては、分水工で80%、排泥工で50%、制水弁工で92%、流量計室ほかで92%であり、大半の施設でコンクリート中の鉄筋とパイプライン本体とが接触しているといえる。また、M地区の空気弁工27施設に、表-1にある調査外の61施設を加え(88施設)、これが所要防食電流密度0.01A/m²以下とした場合、所要防食電流密度0.01A/m²以上となる割合は、約13%となる。よって、H地区と同様、構造的な要因が大きく影響しているものと推測される。

パイプライン付帯施設の構造は、空気弁工のようにコンクリート二次製品を用いて簡易な小規模構造として所要の性能を満たすものと、分水工や排泥工等のように用途や配置位置により構造が異なり、全て鉄筋コンクリート構造で、規模も大きくせざるを得ない施設とがある。このため鉄筋コンクリート構造となる付帯施設の場合は、コンクリート中の鉄筋と鋼管本体との接触の可能性が高く、そこに設置された鋼管と同じ自然電位になるなると共に、カソード側である鉄筋コンクリート構造物の規模が大きいため、カソード部の面積が大きくなり、土壤側の鋼管部分（アノード）の腐食が一層促進されるものと

表-5 漏水事故履歴

施設名称	空気弁工	分土工	排泥工	制水弁工	流量計工ほか	全施設
漏水事故 (箇所)	6	8	21	1	2	38
漏水までの経過年数 (最小～最大)	8 ～17	8 ～19	4 ～16	11	7	4 ～19
管厚 (mm)	4.2	4.5 ～6.0	4.5 ～6.9	6.9	6.6 ～7.0	4.2 ～7.0
管対地電位 (箇所)	1	5	7	1	1	15
(最小～最大) (mV)	-590	-500 ～-180	-395 ～-60	-400	-150	-590 ～-60
腐食速度 (箇所)	6	8	21	1	2	38
(最小～最大) (mm/年)	0.25 ～0.53	0.24 ～0.73	0.31 ～1.13	0.63	0.94 ～1.00	0.24 ～1.13
平均	0.30	0.40	0.62	0.63	0.97	0.55

推測される。

(2) C/Sマクロセル腐食発生の判定とその特性

C/Sマクロセル腐食発生の有無は、土壤抵抗率 $10 \sim 50 \Omega \cdot m$ 、管対地電位 $-400mV$ 以上、電気的導通特性 $0.01A/m^2$ 以上により判定した。本研究での判定結果を表-4に示す。

H地区では、制水弁工、流量計工ほかおよび排泥工では調査対象とした全ての施設でC/Sマクロセル腐食発生が有ると判定された。分土工では26箇所のうち23箇所と88%の施設で発生が有ると判定され、空気弁工を除いた付帯施設では94%が発生が有ると判定された。これらは、コンクリート中の鉄筋と鋼管とが極めて接触しやすい構造となっているからであると考えられる。空気弁工では、一部を除いて、C/Sマクロセル腐食発生が無いと判定した。これは、H地区では調査対象とした、簡易なコンクリート二次製品を使用した側塊構造であり、弁室のコンクリート中の鉄筋と鋼管が接触しにくい構造となっているためであると考えられる。ただし、H地区は中山間地域にあり、パイプラインが急傾斜地に位置している空気弁工では、大規模なコンクリート基礎構造となっている。このような空気弁工では、コンクリート基礎部の鉄筋と鋼管とが接触しやすくなるために、C/Sマクロセル腐食の発生が有り得ると推察した。

M地区では、分土工、排泥工、流量計室ほかおよび制水弁工(63施設中48施設)で、調査対象とした76%以上の施設でC/Sマクロセル腐食発生が有ると判定された。これは、H地区同様コンクリート中の鉄筋とパイプライン本体とが接触しやすい構造とな

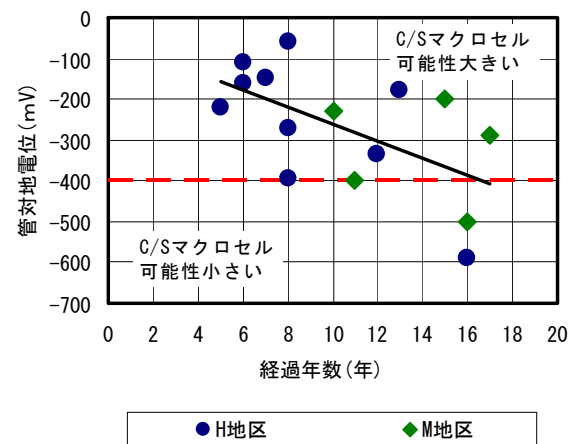


図-8 管対地電位と経過年数

っている事に起因していると考えられる。また、M地区の空気弁工がH地区に比べ、C/Sマクロセル腐食発生が有ると判定した割合が高くなったのは、H地区で、コンクリート基礎構造となっている施設のみを調査の対象としたことに起因しており、コンクリート基礎部の鉄筋と鋼管とが接触しやすい構造となっている事が推察できる。

(3) C/Sマクロセル腐食発生要因とその速度特性

調査対象地区の漏水事故履歴が確認されている2地区の全38箇所について、付帯施設別の漏水発生までの経過年数と管厚の関係を表-5に、この施設の内、管対地電位が測定されている施設と漏水発生までの経過年数との関係を図-8に示した。

埋設された鋼管については、一般的な腐食速度が $0.14mm/年$ といわれている¹¹⁾。本調査対象地区では表-5のように、最も小さい分土工の腐食速度でも $0.24mm/年$ 、最も大きい排泥工の腐食速度に至っては $1.13mm/年$ となっており、調査対象地区の付帯施設近傍のパイプラインにおいては、腐食が極端に促進されてきているといえる。この腐食の極端な速さは、調査対象の2地区ともに、中山間地域若しくは丘陵地にあり、腐食性の土壌に無いことや施工状況から見て、異種金属の接触等もなく、電鉄や電気防食施設も無いことから、マイクロセル腐食および電食によるものとは考えにくい。

図-8は、補修前に管理者側で計測した管対地電位15データによるものである。H地区とM地区を比べると、H地区の方が漏水に至る経過年数が若干早く、M地区の方がやや遅い傾向にある。しかし、これらの地区の違いで極端な違いは少なく概ね管対地電位が高い施設において漏水発生に至るまでの経過年数が短い傾向にあるといえる。また、この15箇所の施

設のうちの13箇所の管対地電位は、C/Sマクロセルを形成する-400mV以上の値を示している。

以上のことから、調査対象地区の付帯施設近傍のパイプラインにおける漏水発生は、C/Sマクロセル腐食が主要因になっていると考えられる。これは、前述のように、多くの付帯施設においてコンクリート中の鉄筋と鋼管とが極めて接触しやすい構造となっているにもかかわらず、これまで付帯施設の施工時に両者が接触しないようにするという配慮が十分なされていなかったことに起因しているものと推察した。

6. おわりに

本研究では、パイプラインを対象にC/Sマクロセル腐食による影響を評価した。測定項目は、土壤抵抗率測定、管対地電位測定および電氣的導通特性測定とした。計測はH地区とM地区、2地区の幹線水路に付帯する施設173箇所に対して実施し、漏水事故の履歴がある38箇所については施設別の漏水発生までの経過年数と管厚との関係からパイプラインの腐食速度を評価し、管対地電位と経過年数との関係を考察した。この結果より得た知見を以下にまとめる。

- 1) 土壤抵抗率測定の結果、2地区とも腐食性として「小」に該当する土壤が全体の約80%を占めており、地区による相違は見られなかった。加えて2地区ともに「激しい」に該当するものは無いことから、土壤自体が鋼管の腐食を促進させる強い要因ではないと考えられる。
- 2) 管対地電位測定の結果、H地区では、空気弁工を除いた付帯施設の72%が-400mV以上の値を示しており、C/Sマクロセルが形成されやすい状態にあるが、M地区では、この割合が39%に留まった。しかし、2地区共に空気弁工では、C/Sマクロセルが形成されにくい構造であることが判明した。
- 3) 電氣的導通特性の測定値から所用防食電流密度を算出した結果、H地区では空気弁工を含んで全体の45%、M地区では70%の施設でコンクリート中の鉄筋と鋼管本体とが接触しているといえる。空気弁工では 0.01A/m^2 以上の値を示すものが地区で23%であり、M地区では簡易な構造として調査外したものを含むと13%と少なく、鉄筋と鋼管本体とが接触しにくい構造物であることが判明した。
- 4) C/Sマクロセル腐食発生の判定から、空気弁工を除く施設では、H地区で94%がC/Sマクロセル腐食の発生が有ると判定され、M地区では76%以上

の施設が有りと判定され、2地区ともに高い割合を示したことが判明した。

- 5) 漏水事故履歴から、管対地電位が-400mV以上の電位を示している施設において漏水発生に至るまでの経過年数が短い傾向があり、C/Sマクロセル腐食が鋼管の腐食速度を大きくしていることが推察された。

以上より、研究対象とした2地区に大きな差異や特色は見られず、パイプラインが急速な腐食によって損傷に至る主要因は、付帯する鉄筋コンクリート構造の施設においてC/Sマクロセル腐食が強く影響していると推察され、漏水事故の誘因になっていると考えられる。漏水位置の特定は筆者らが開発しているAE法による非破壊モニタリングにより可能であり、各電位指標の計測とAE計測を組み合わせることにより非破壊かつ非掘削による損傷同定が可能になるものと考えられる。

参考文献

- 1) 防錆防食技術総覧編集委員会：防錆・防食技術総覧，産業技術サービスセンター，pp. 1002, 2000.
- 2) 伊藤久也，鈴木哲也，河野英一，青木正雄：土壤環境における鋼製パイプラインのC/Sマクロセル腐食の特性，環境情報科学論文集23(2009)，pp. 505-510, 2009.
- 3) 鈴木哲也，大野健太郎，大津政康：漏水現象のAEモニタリングによる配管施設の危険度評価，農業土木学会誌，Vol.73，No.11，pp. 25-28, 2005.
- 4) 伊藤久也，鈴木哲也，青木正雄：弾性波を用いた石綿セメント管の定量的損傷度評価に関する研究，コンクリート構造物の非破壊検査論文集，Vol.3，pp. 59-64, 2009.
- 5) 鈴木哲也，大津政康：非破壊弾性波モニタリングに基づく埋設型配管施設の通水性能評価に関する研究，材料と施工45，pp. 41～87, 2007.
- 6) 日本水道協会：水道施設設計指針2000年版，(社)日本水道協会，pp. 781, 2000.
- 7) 農林水産省農村振興局整備部設計：土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 設計「パイプライン」基準，技術書，(社)農業土木学会，pp. 412, 2009.
- 8) マクロセル腐食防食指針専門委員会：マクロセル腐食防食指針WSP045-90，日本水道鋼管協会，pp. 1, 1990.
- 9) 水道用鋼管ハンドブック編集委員会：水道用鋼管ハンドブック，日本水道鋼管協会，pp. 886, 1980.
- 10) 防食委員会：マクロセル腐食防食指針WSP045-2008，日本水道鋼管協会，pp. 26-27, 2008.
- 11) 電気学会電食防止研究委員会：電食・土壤腐食ハンドブック，コロナ社，pp. 465, 1977.