



図 4.6.16 試験に使用した付着物

付着物 A : 内径の $\frac{1}{2}$

付着物 B : 内径の $\frac{1}{4}$

付着物 C : 内径の $\frac{1}{8}$

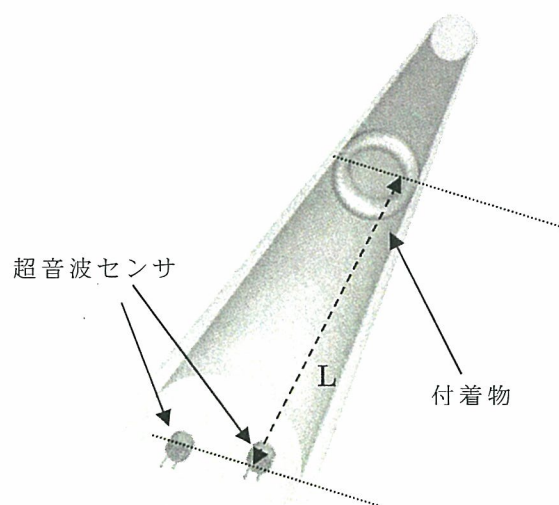


図 4.6.17 測定装置概略図

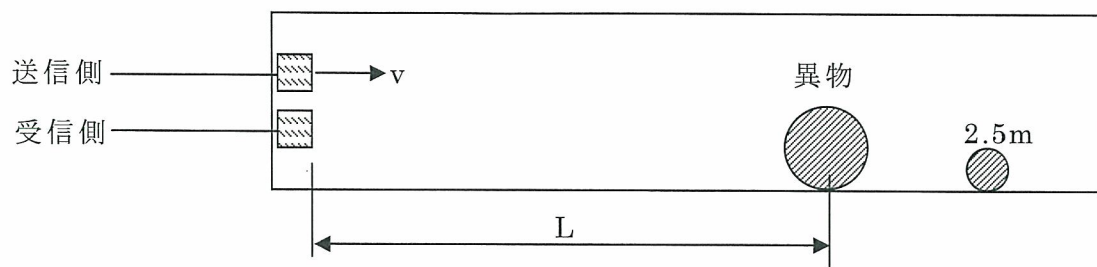


図 4.6.18 測定装置概略図

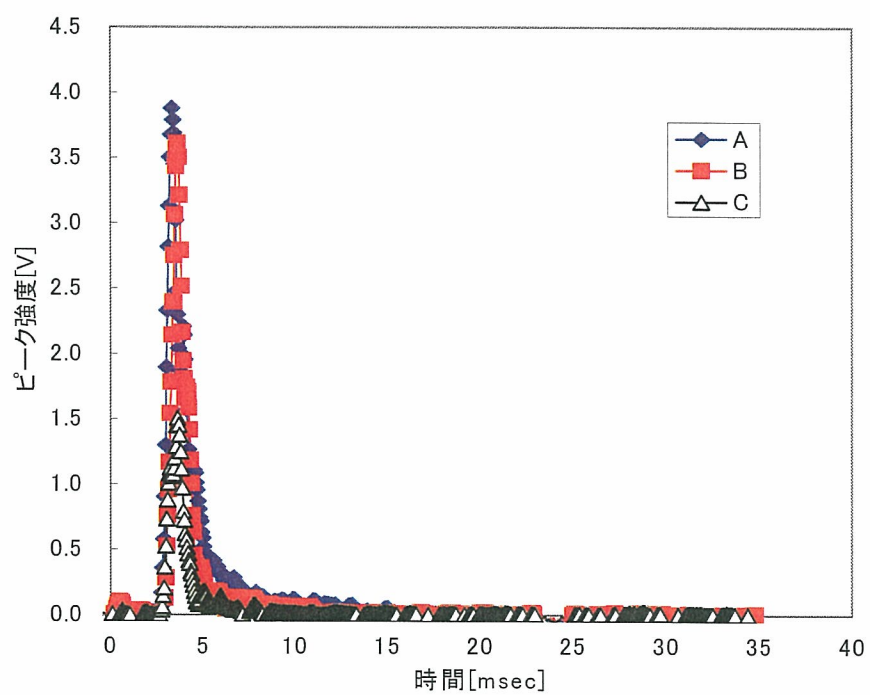


図 4.6.19 0.5m の位置に付着物を設置した場合のエコー

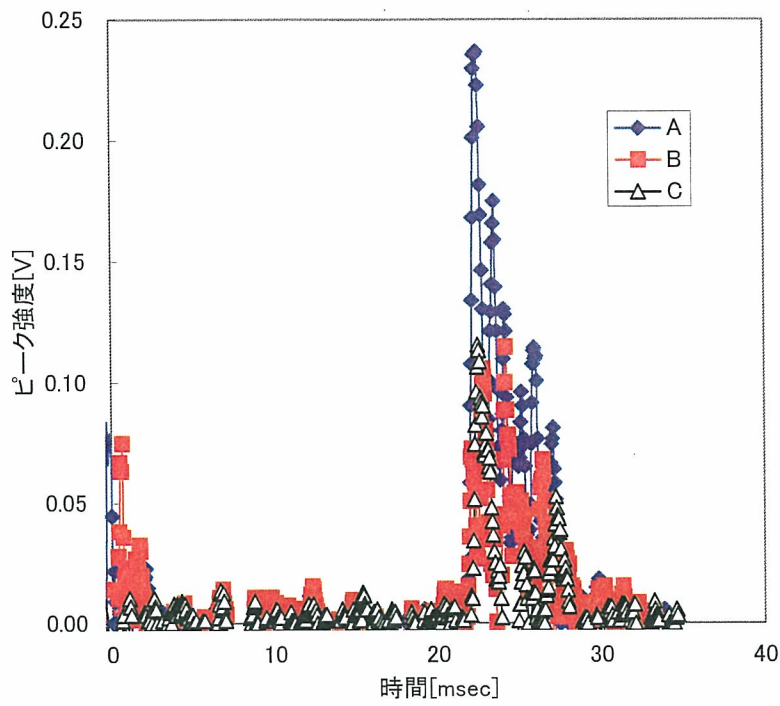


図 4. 6. 20 4m の位置に付着物を設置した場合のエコー

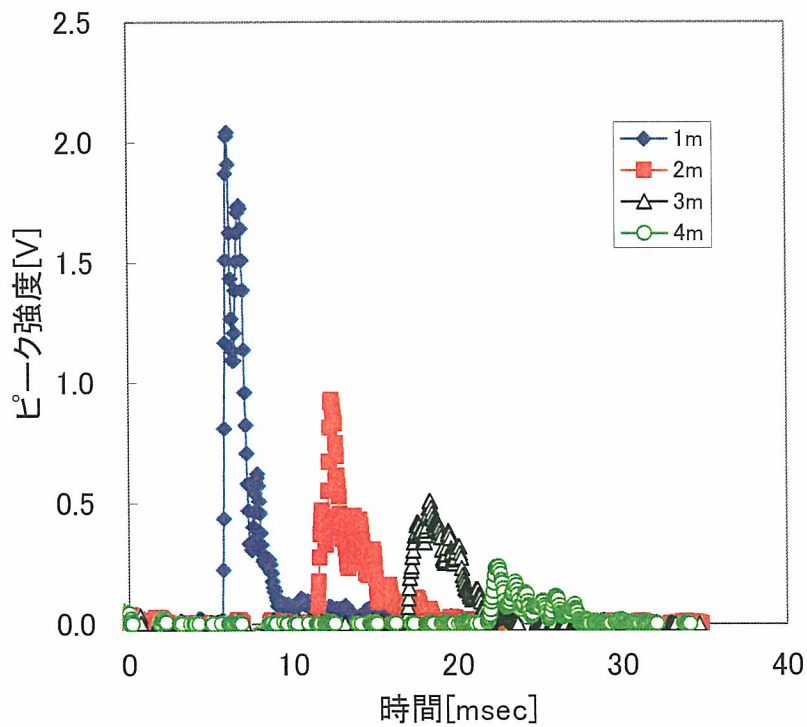


図 4. 6. 21 付着物 A の位置を変化させた場合のエコー

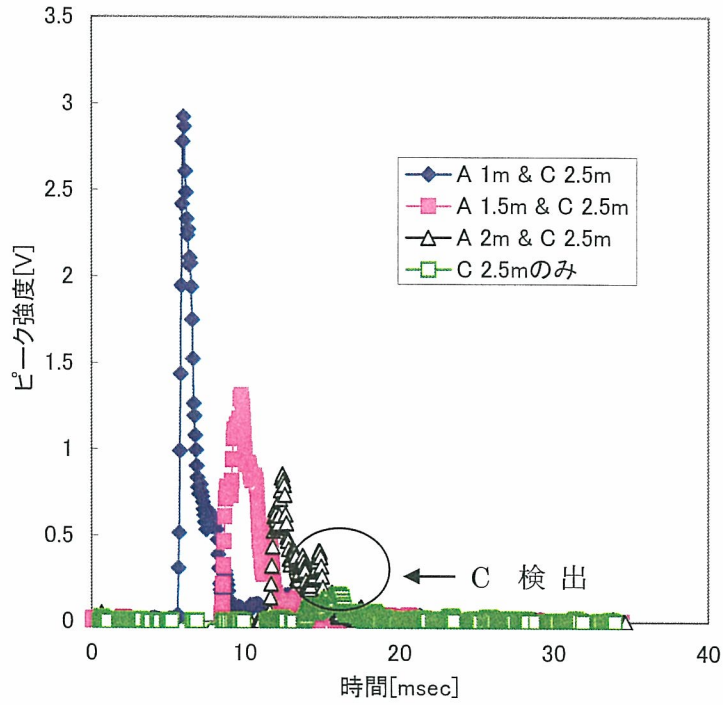


図 4.6.22 付着物の位置を動かした場合のエコー

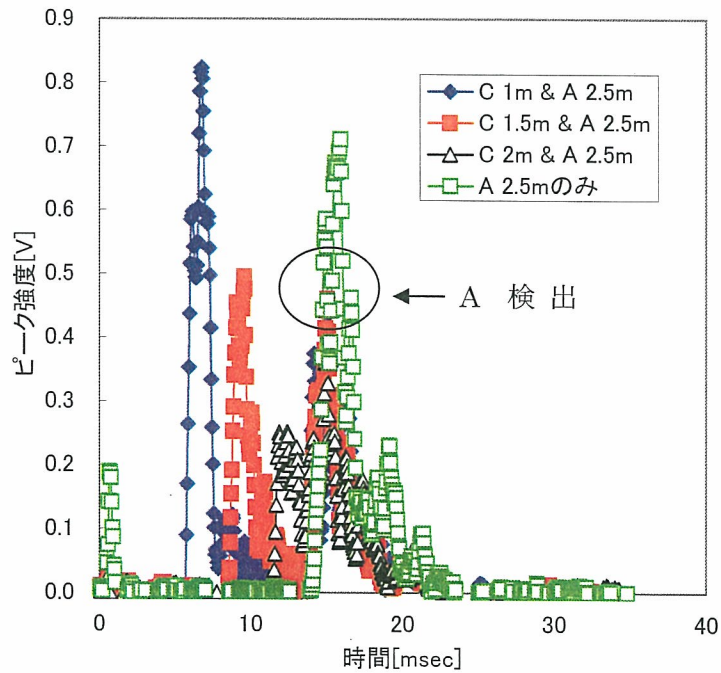


図 4.6.23 付着物の位置を動かした場合のエコー

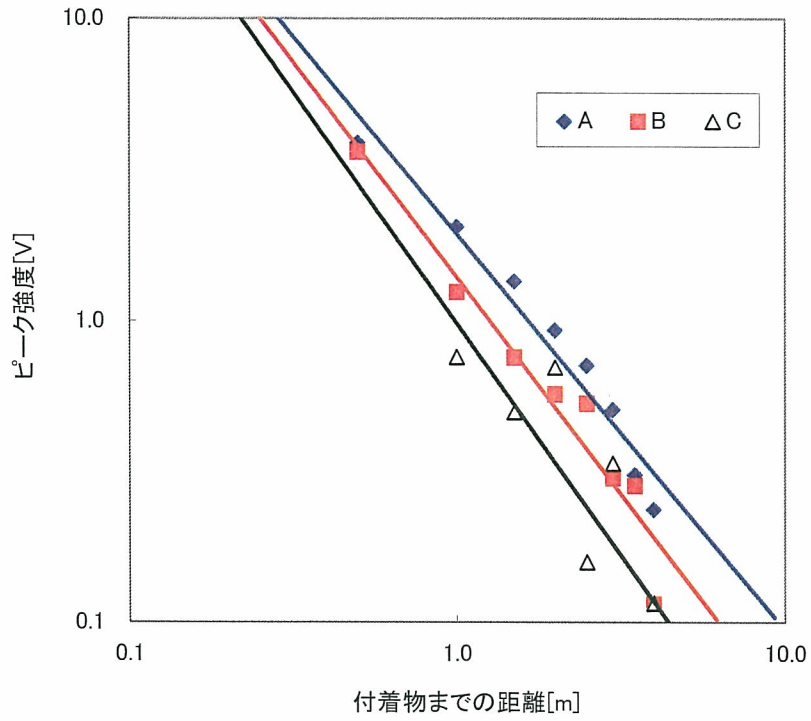


図 4.6.24 各付着物におけるピーク強度と距離の関係

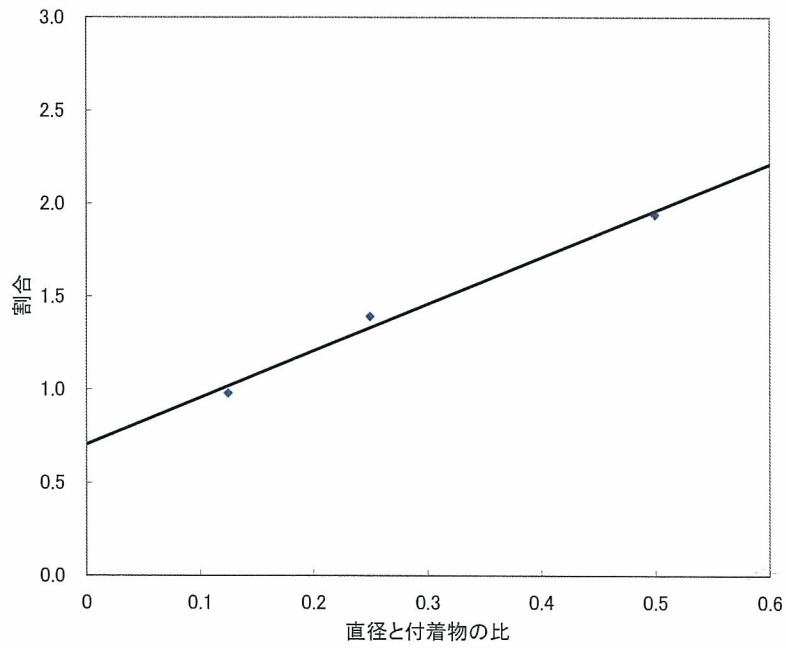


図 4.6.25 各付着物におけるピーク強度と距離の関係

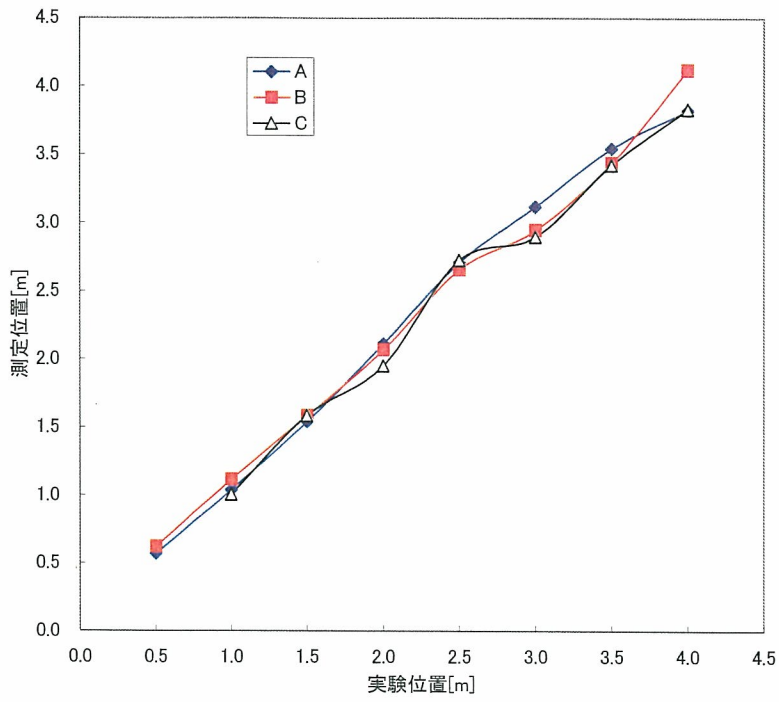


図 4.6.26 計測位置と測定距離の関係

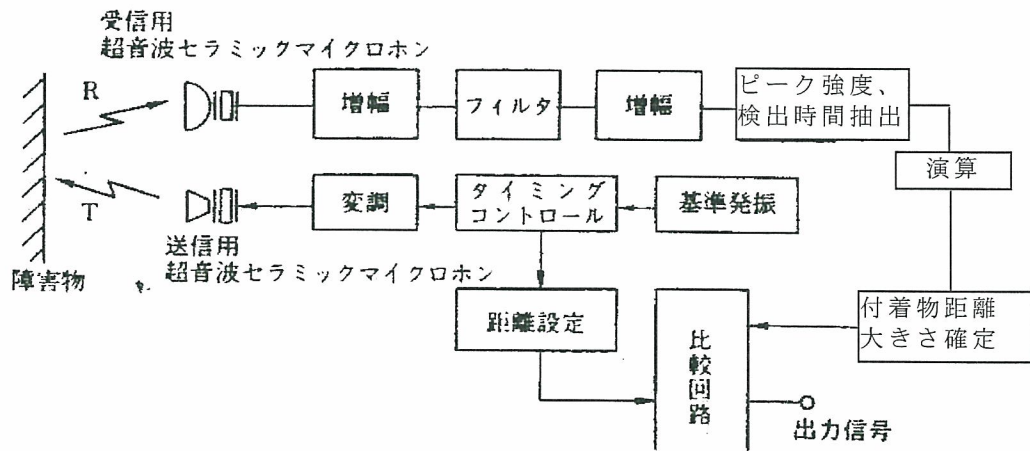


図 4.6.27 付着物検出システム

4) 結言

本研究において、超音波距離計を用いて管内に存在する付着物が検出できることが判明した。ピーク強度は距離の $\frac{3}{2}$ 乗に反比例し、発振した超音波のエコーの受信計測時間及びピーク強度から付着物の位置及び大きさが特定できた。検出時間までの時間から付着物までの距離を求め、それから検出したピーク強度及び(18)式を用いて付着物の大きさを求められることが判明した。これらのことから本装置を用いて管内面に存在する付着物を検出できる可能性が示された。

実際の環境下において、付着物は一つではなく複数存在すると考えられる。そこで、管内に複数の付着物が存在する場合においても試験を行った。結果は複数の付着物が存在してもそれぞれ検出することが示された。また、前方の付着物の位置によらず、後方に存在する付着物のピーク強度はほぼ一定であり、前方の付着生成物の位置によってピーク強度に影響は受けないことが示された。ただし、単一の場合よりピーク強度が低下するため、その減衰率に関しては更なる検討が必要である。

本試験で得られた結果より、計測システムの提案を行った。今後、提案したシステムが可能かどうか更なる検討を行う必要がある。

5) 今後の研究課題

本試験では、管内に存在する異物の検出が可能であることが示された。今後は実用化に向けて更なる試験を行い、検討する。その際検討すべき課題として以下の問題が挙げられる。

第1に測定装置の構成及び回路の問題である。水中では波長が長くなるため、本試験で使用した周波数では分解能が低下すると考えられる。通常、ソナーとして使用されている超音波センサは主に200kHzが使用されているが、本研究で想定している管内面の付着物は微小であり、これより高周波の超音波センサを使用する必要があると予想される。よって、検出に最適な周波数の検討もまた行う。また、管内での音波の伝播は管壁と水の相互作用として伝わるため管の材質や口径で音速が変化する。このため付着物の位置を正確に掴むためには管内音速を明確にしなければならぬ。そのため温度センサ、温度測定回路を組み込む必要がある。

第2に管に付着している付帯物の影響である。管に付着した部分ではパルスが反射し、エコーとして受信される。通常、付帯物は予め設置場所が判明しているため、付帯物によるエコーが生じたとしても特定できるため、問題は生じないが、付帯物周辺に生じる付着物が検出できない可能性がある。そのため、付帯物に付着物がいない状態及び付着物が存在する場合において試験を行い、付着物の存在によってピーク強度の変化を明らかにする。

第3に配管内の曲がり部分、継ぎ手部分等の影響を検討する必要がある。これも第2点と同様にこれらの領域近傍に存在する付着物の検出が困難であると予想される。そのため実験により検討を行う。

第4に複数の付着物が存在する場合の検討である。本試験で複数の付着物が存在する場合、位置を検出することは可能であると判明した。しかし、大きさに関してはピーク強度が前方の付着物によって低下するため、前方に存在する付着物によるピーク強度の減衰率を算出する必要がある。今後、付着物が複数存在する場合、後方に存在する付着物に関しても大きさが特定できるよう、減衰率の算出を行う必要がある。

第5に測定範囲の設定である。実際の測定では測定範囲を設定することにより、使用機器の電力等コスト面が決定される。今後実用化に向けてコスト面での考慮を行うために、測定範囲について検討を行う。

第6に本試験において提案したシステムに関して具体的な検討を行う。実環境ではこれら計測システムに加えて、温度測定回路等様々な回路を組み込む必要がある。また、通常ソナーとして使用されている超音波距離計は大型であり、管内部に挿入するのは困難である。そのため、管径100mm以下の管路に対しても使用できるように小型の測定システムを開発しなければならない。

これら上記の点に関して実証試験を行い、実用化に向けて取り組む必要がある。

4.6.2 電磁波の伝播と反射を用いた

金属製水道管路の欠損の検出（パルス・エコー法）

研究担当委員／横浜国立大学 朝倉 祝治

1) 緒言

老朽化した管路施設の更新・改良については、健全な水循環の形成という観点から、衛生面や環境負荷面に配慮し、効率的・計画的に行わなければならない。しかし、管路の大部分は地中に埋設されており、その状況が容易に把握できないため、管路更新を効率的・計画的に行うには、残留塩素の減少・消失等の水質劣化調査や、非開削等による物理化学的調査、各種センサー技術などを応用して適用を図り、管路機能の低下や管内外面の劣化状況を総合的に診断・評価することが必要であり、更新等の優先順位付けに役立つ、管路の老朽度診断手法ならびに要素技術の開発が望まれる。

電気伝導体にパルス電流を印加すると欠損部分で電磁波の反射が起こり、エコーパルスが発生する。エコーパルスはサンプリングオシロスコープなどで検出することができる。この原理を金属製の水道管路に適用すると腐食や折損で管路に生じた欠損の部位とその大きさを比較的長区間にわたって非掘削で検出できる可能性がある。本研究はこの方法の可能性を実験室的に確認することである。さらに提案している方法について電磁気学的な検討を詳細におこない、計測技術の現状を踏まえその可能性について詳細に考究する。同時に本方法が実用化したときの計測装置のスケッチ提案し、この方法の経済性についても予測評価する。

本研究を実施することにより、現在更新時期を迎えている管路施設の効率的・計画的な更新が図れるとともに、安全・安心でおいしい水の安定的な供給に資することができる。更新等を契機に、管路の安全性や耐震性等の強化を図ることにより、次世代を見据えたより高度な管路施設システムの構築が可能となる。

これらの研究により、各水道事業者が将来のことを考え、今の段階から管路施設の老朽度や更新の必要性を総合的に評価し、効率的・計画的に管路更新が進められるよう支援していくことを目的とする

2) 理論的検討

(1) 電磁波反射の原理

導体の抵抗値を直流あるいは低周波信号源のインピーダンス計で測定する場合、図 4.6.28 のような等価回路となる。ここで、信号波が瞬時値 V_0 の電圧となったとき、負荷抵抗の両端にはこれと同じ電圧が同時に加わっていると考えられる。また信号源と負荷抵抗間の任意の点で電圧を測定してみても V_0 となっていると考えられる。ところが厳密な同一時間でいうと $V_0 \neq V_1 \neq V_2 \neq V_3$ である。

例えば、図 4.6.29 のように直流電源の近くにスイッチを設け、その先 300km 本の導線を平行に引き、その先端に負荷抵抗を接続した状態の電流の伝搬を考える。このときスイッチを ON にした瞬間には 300km 先の負荷抵抗には電流が流れ始めない。電源からスイッチまでの導線には電荷があり、その導線間には電界が存在している。スイッチを ON するまではその先の 2 本の長い導線には電荷がなく、したがって、電界も存在しないが、ON にするとその瞬間から、電荷が長い導線に流れ込み、負荷の方向に向かって流れていく。つまりスイッチの近くから電流が流れ始めることになる。すると右ネジの法則にしたがって、導線の廻りには磁界が発生し、電界と磁界がこれらと直角方向である負荷抵抗の方向に向かって進んでいく。この進む速さ v は導線の抵抗がないものとするとき空中なので光速と等しく、ほぼ $3 \times 10^8 \text{m/s}$ ある。したがって 300km 先の負荷抵抗には、スイッチ ON から約 1ms 後に電流が流れ始める。

次に図 4.6.30 のように、直流電源の代わりに、1kHz の交流信号源を接続した場合の電流の伝搬を考える。信号源から流れた電荷が負荷に到達するまでの間に、 V_0 は 1 サイクル変化し、これに応じた電荷が次々と送出される。この電荷は、導線を伝わって負荷の方向に流れる。ここで負荷抵抗に電荷、すなわち電流が流れている状態で、 V_0 が正のピーク値になった瞬間を想定してみると、信号源から負荷抵抗までの間の電荷と電界の様子は図 4.6.30 (a) のようになる。また、導線間の電圧の分布は、図 4.6.30 (b) のようになる。この例では V_3 は V_0 に比べ、位相が 360° 遅れた状態になったので、瞬時値は等しくなっている。ところが A 点における V_1 、B 点における V_2 はその瞬時値が V_0 や V_3 と異なる。

図 4.6.30 で接続した信号源の周波数を 1kHz から更に 1GHz に高くしてみる。このときは信号源から電荷が流れ出して 1 波長が約 30cm 進む間に、信号源電圧 V_0 は 1 サイクル変化する。いい代えると、信号源から電界と磁界が 30cm 進む間に信号源では位相が 360° 遅れ、これと同じ電界と磁界を発生するということになる。

図 4.6.28～図 4.6.30 で、信号源と負荷抵抗の間を結んでいる 2 本の導線を伝送線路と呼ぶ。従って、高周波信号は、振動する電界と磁界をもった波と考えることができる。また、信号源から送信されるこの波は、負荷抵抗に向かって進むため、この波は前進波または進行波と呼ばれる。また、信号源から伝送線路に入力されるので入射波とも呼ばれる。つまり図 4.6.28～図 4.6.30 で説明したことは、伝送線路を前進波が伝搬する様子を説明していたことになる。

次に、伝送線路には負荷抵抗側から戻ってくる波もあり、これを後進波または反射波と呼び、伝送線路に反射波が現れる様子を説明する。図 4.6.30 (b) は、 V_0 が正のピークになった瞬間の伝送線路上の電圧分布を示しているが、進行波が負荷抵抗に向かって進むとき、信号源から流れ出た電荷がすべて負荷抵抗に吸収されないで、一部が伝送線路に戻ってくるものとする、進行波と反射波が伝送線路上で干渉しあい、伝送線路の長さによって V_1 、 V_2 、 V_3 の最大値は、もとの V_0 に比べ大きくなったり小さくなったりする。伝送線路を進む交流信号は、振動する電界または磁界を伴って進むので、限定された空間を進む電磁波と考えられる。したがって電波が建物や地面で反射するのと同じように、伝送線路でも反射が起こる。

図 4.6.31 (a) は高周波信号源を伝送線路に直接接続し、負荷端を開放（インピーダンス $=\infty$ ）したときの進行波と反射波および、伝送線路上の電圧分布をある瞬間をとらえて示したものである。図 4.6.31 (b) は、伝送線路上を進行波と反射波が伝搬しているときに発生する電圧振幅の最大値を示したものである。

図 4.6.32 (b) は、負荷端を短絡（インピーダンス $=0$ ）した場合に、伝送線路上に発生する電圧振幅の最大値を示したものである。負荷端を短絡した場合は、負荷端の電圧は常に 0 になる。この場合、負荷端に+の電荷が到達したとき、これと同量の-の電荷が負荷端で発生すると考えればよいので、負荷端開放の場合の反射波とは逆相の反射波になる。この様子を図 4.6.32 (a) に示す。

図 4.6.31～図 4.6.32 から分かるように、伝送線路上で電圧振幅が常に 0 の所と、最大になり得る所とが存在する。その点は負荷端から高周波信号の伝送線路上の $\frac{1}{4}$ 波長の整数倍の距離にあり、負荷短絡の場合と開放の場合とで逆転している。

信号源インピーダンス $=$ 伝送路インピーダンス $=$ 負荷インピーダンス（エネルギー最大供給の条件）のときは、信号源から送信した電磁波はすべて負荷方向に供給されて反射波は発生しない。この状態をインピーダンス整合がとれているという。

整合がとれていない場合、伝送線路上には進行波のほかに反射波が存在し、これらが合成されて $\frac{1}{4}$ 波長ごとに電圧振幅が大きい所と小さい所ができ、このうねりを定在波（standing wave）と呼ぶ。また、その最大値を最小値で割った値を定在波比（standing wave ratio : SWR）という。遊行波、反射波の振幅を電圧で扱う場合が多く、この場合は VSWR（voltage SWR）といわれる。また進行波と反射波の関係を示すものを反射係数と呼ぶ。これらは振幅について式で表わせば、

$$\text{反射係数}\Gamma = \frac{\text{反射波の振幅}}{\text{進行波の振幅}} \quad \dots(1)$$

伝送線路の特性インピーダンスを $R\Omega$ とし、負荷抵抗を $RL\Omega$ とすれば

$$\Gamma = \frac{RL - R}{RL + R} \quad \dots(2)$$

$RL > R$ なら $\Gamma > 0$ 、 $RL < R$ なら $\Gamma < 0$

と表せる。反射係数 Γ は進行波に対する反射波の位相も示し、 Γ が $+$ の値をとるのは、負荷端を開放したとき ($R_1 = \infty \Omega$) の反射波と短絡したとき ($R_1 = 0 \Omega$) の反射波とは位相が逆転していることと対応している。

定在波比 SWR は

$$SWR = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \dots(3)$$

となる。

したがって、反射波が発生している状態において、伝送線路のインピーダンス R が既知で、進行波と反射波の電圧を測定できれば、(1)式と(3)式から未知の負荷のインピーダンスを導くことができる。

(2) 測定分解能

(1) で説明した伝送線路の信号源を図 4.6.33(a) のパルス波にしてみる。伝送線路あるいは負荷で反射が発生するとき、その様子をオシロスコープで測定すると、(b) のように、反射波はインピーダンス不整合点 (反射点) を往復する時間遅れて観測できる。反射点の距離が遠くなれば (c) のように更に遅れて観測できるが、その時間差を識別するためには送信パルス波の幅は

$$t_p \leq \Delta t_2 - \Delta t_1$$

を満たす必要がある。

このパルス幅 t_p は、伝送線路のパルス伝搬速度にも依存する。

伝送線路のパルス伝搬時間は、図 4.6.34 のような土壌をアース (導体とみなす) とした埋設配管において、光速を $3 \times 10^8 \text{m/s}$ 、埋設配管の防食塗料の比誘電率を ϵ とすると

$$vg = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{\epsilon}} \dots(4)$$

で表される。

図 4.6.35 は誘電率と伝搬速度の関係で、比誘電率が大きいほど伝搬速度が遅くなる傾向にある。図 4.6.36 は測定分解能とパルス幅の関係、図 4.6.37 は測定分解能と装置動作周波数の関係である。測定分解能が 1m の場合で送信パルス幅は約 5 ns 以下の条件が必要で、そのパルスを発生する装置の動作速度は 200MHz 以上となる。測定分解能を小さくするほど送信パルス発生装置の動作速度は高周波になる傾向を持つ。

(3) 鋼管への原理応用

電話ケーブルの障害検知技術としてこれはケーブルにパルスを送信し、そのエコーを解析することで、電話ケーブルの異常検知を行っている。これは図 4.6.38 に示すように同軸線路内の電界と磁界を利用したものである。

本試験で行う方法は、これを応用したもので埋設配管にパルスを送信し、その反

射波から腐食減肉部、腐食孔を検出しその箇所を推定する（図 4.6.39 参照）。これは、電話ケーブルの障害検出では 4～5km 離れた場所の異常を検知することが可能であるので、本試験で行う方法において 4～5km 離れた腐食箇所を検出することができると考えられる。

本試験では図 4.6.39 に示すように、土壌埋設配管にパルス電圧を印加し、その反射波（エコー）から腐食減肉部、腐食孔を検出し、その位置も推定する図 4.6.40 に模式図を示す。入射したパルスが腐食孔等の異常検知部でエコーとして反射する。その反射波が戻ってくるまでの時間及び、ピーク強度を図 4.6.41 のように測定し、それによって劣化部までの距離及びその程度を検知するものである。パルス波が配管を伝わる速度を V [m/s]、反射波が送信点で観測される時間を Δt [s] とすると、腐食位置までの距離 l [m] が測定できる。

$$l = \frac{V \cdot \Delta t}{2} \dots (5)$$

また、反射波の大きさから腐食の規模が推定できると考えられる。

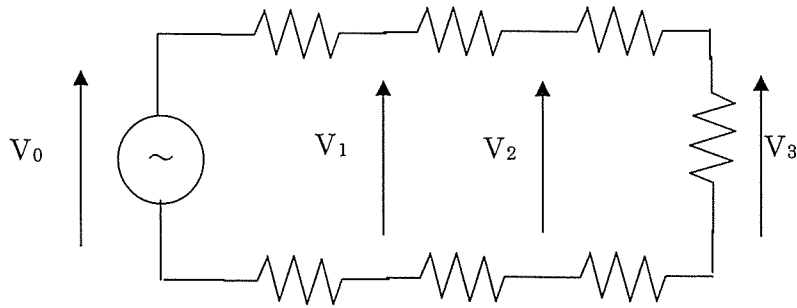
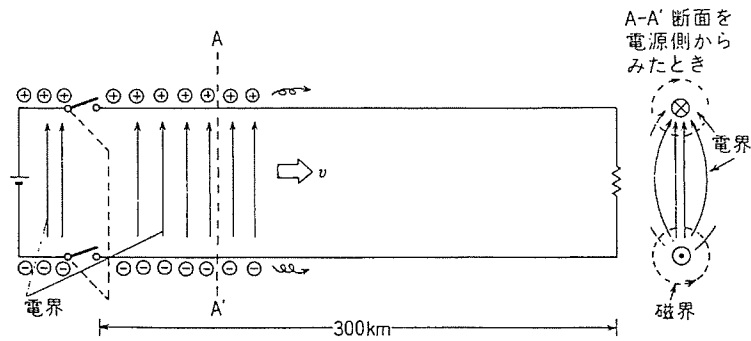


図 4.6.28 信号源が負荷を駆動するときの様子



$$v = C_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} \approx 30 \text{ 万 km/s}$$

$C_0 = \text{光速}$ $\epsilon_0 = \text{真空(または空気)中の誘電率} = 8.86 \times 10^{-12} [\text{F/m}]$ F: ファラッド
 $\mu_0 = \text{透磁率} = 4\pi \times 10^{-7} [\text{H/m}]$ H: ヘンリー

図 4.6.29 遠方の負荷を直流駆動するときの様子

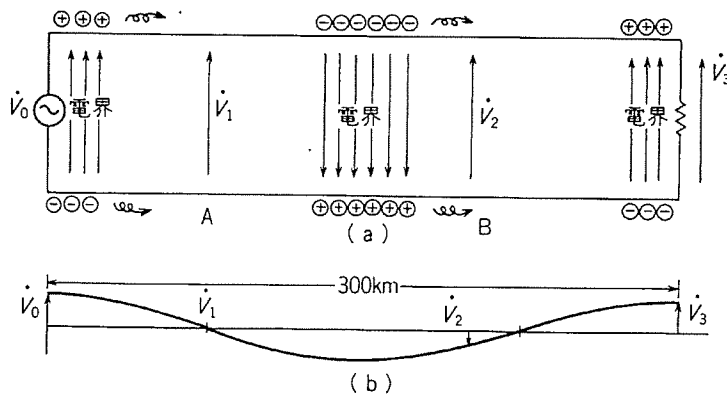


図 4.6.30 遠方の負荷に交流が流れるときの様子

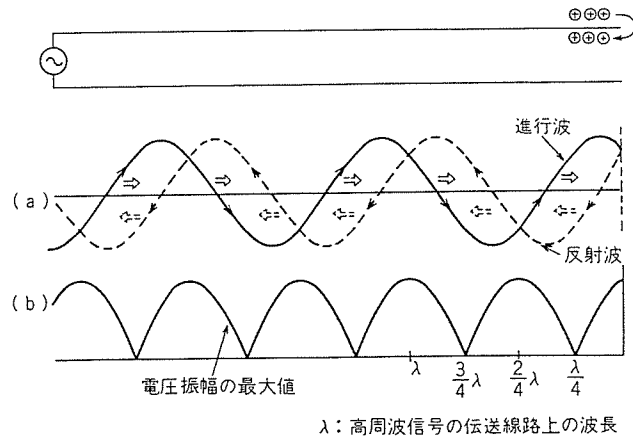


図 4.6.31 負荷端開放時（インピーダンス=∞）の様子

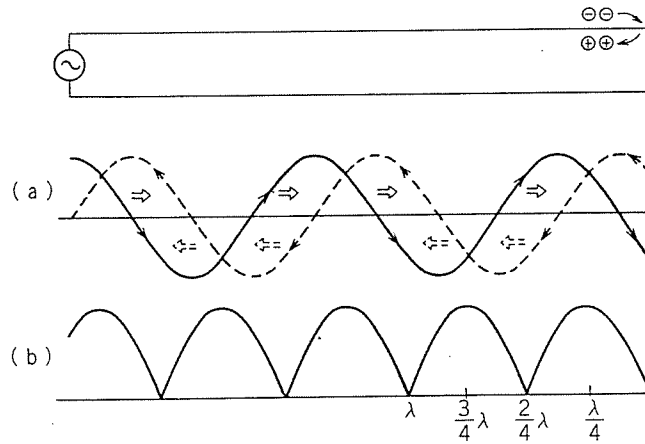


図 4.6.32 遠方の負荷に交流が流れるときの様子

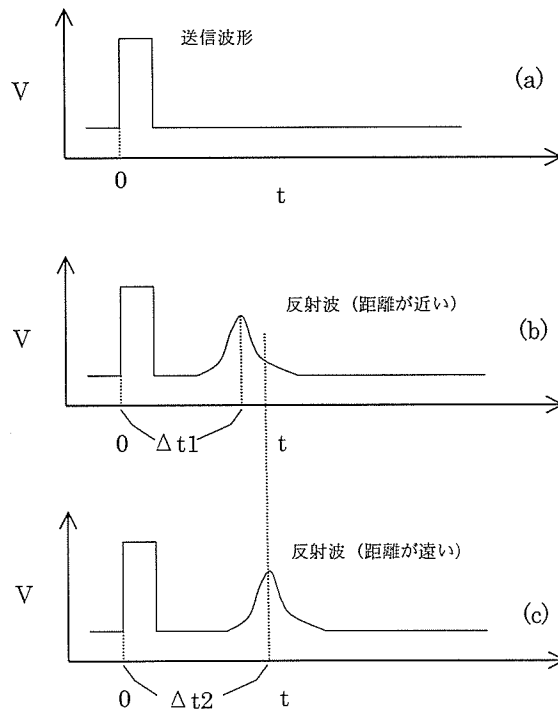


図 4.6.33 反射波形の模式図

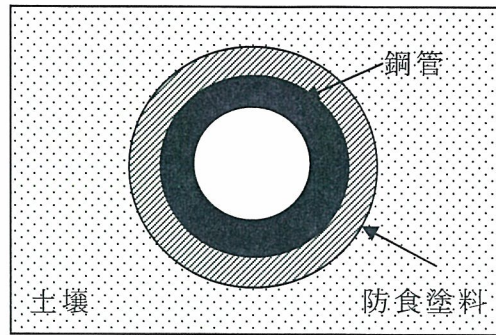


図 4. 6. 34 土壌に埋設された配管

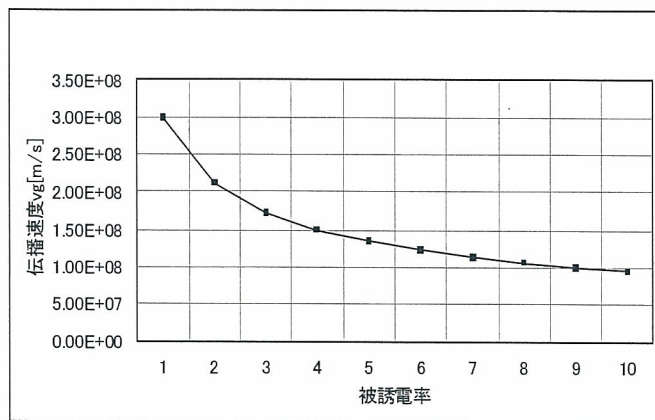


図 4. 6. 35 誘電率と伝搬速度

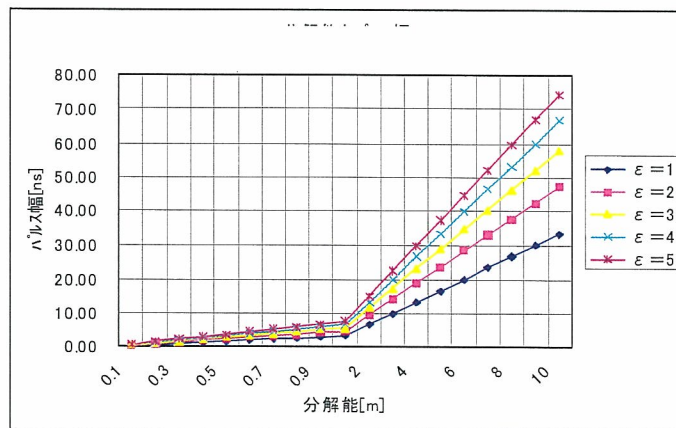


図 4. 6. 36 分解能とパルス幅

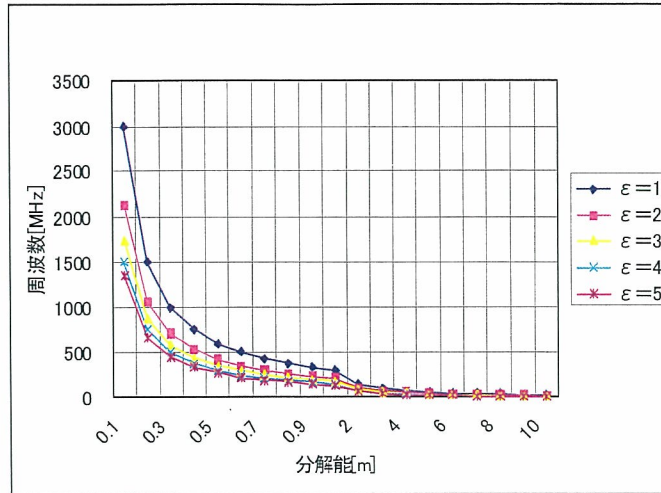


図 4.6.37 分解能と周波数

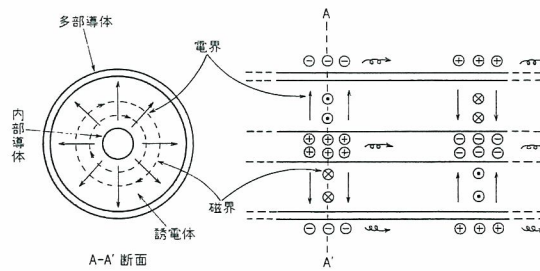


図 1-11 同軸線路内の電界と磁界

図 4.6.38 同軸線路内の電界と磁界

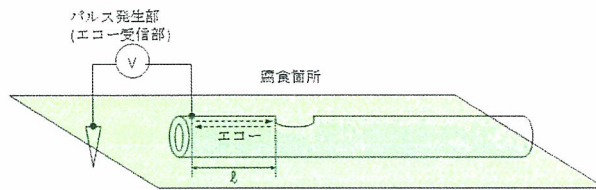


図 4.6.39 埋設鋼管への応用原理図

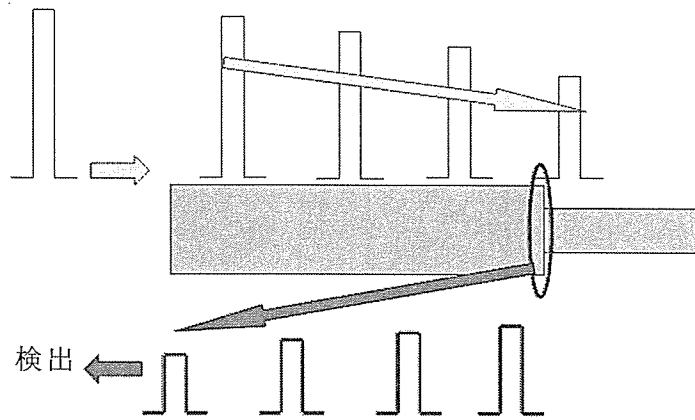


図 4.6.40 鋼管内への送信されたパルスの変化

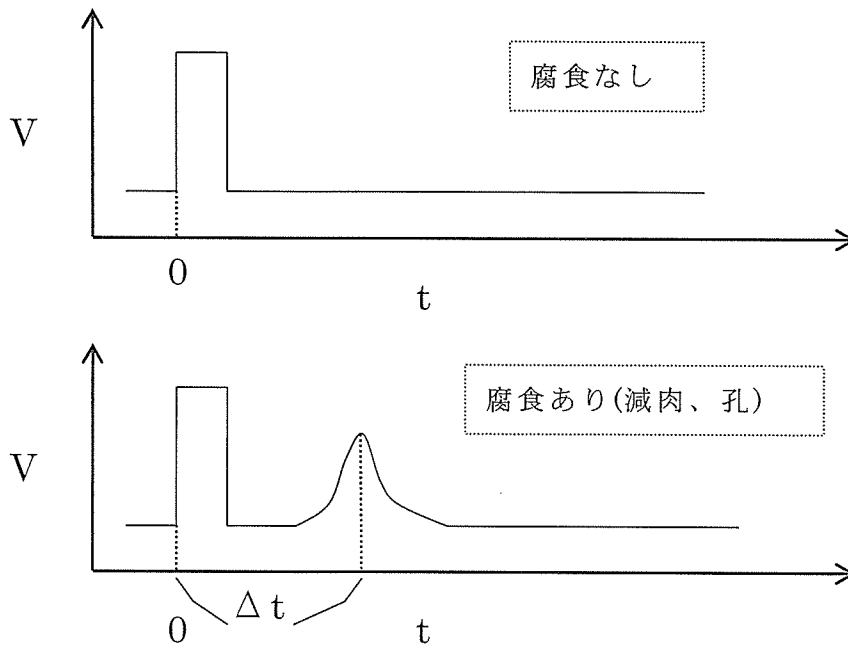


図 4.6.41 反射波形の模式図

3) 電磁波の伝搬と反射を用いた金属製水道管路の欠損の検出原理確認試験

(1) 通信ケーブルによる原理確認実験

① 試験目的

電磁波によって金属管の劣化を検知するにあたり、まず異常部を検出できるエコーが測定できなければならない。本試験では電磁波が伝搬する経路において、そのインピーダンスに変化点がある場合、つまり異常部が存在する場合、伝搬中の電磁波はその送信方向に反射され、検出される。この原理を確認するために、伝搬経路のインピーダンスが既知で安定した通信ケーブルに劣化を与えて原理を確認した。

② 試験方法

インピーダンス 75 オームの通信ケーブルにおいて、インピーダンス $\infty\Omega$ （オープン）/ 0Ω （ショート）の擬似劣化を与え、パルス波を送信して劣化位置から反射されてくるまでの時間を測定して故障位置を特定した。

使用した通信ケーブルの長さは約 100m で 100m の終端位置と 50m の中間位置に擬似劣化を発生させた。実験装置図を図 4.6.42 に示す。ケーブル内のパルス波の伝搬速度 V は $5[\text{ns/m}]$ で、パルス波の送信から反射波を受信するまでの往復時間 $T[\text{ns}]$ から、パルス波送信点からの劣化位置までの距離 $D[\text{m}]$ は

$$D = \frac{T}{2V} \quad \dots(6)$$

で求めた。

③ 試験結果

試験結果を図 4.6.43～図 4.6.47 に示す。図 4.6.43 は正常な状態での応答曲線である。図 4.6.44～図 4.6.47 は各条件においてそれぞれその状態を示すようにエコーが検出された。つまり、断線の場合は同位相で検知され、ショートの場合は位相が逆転して検出されることが示された。また、異常検知は一箇所だけでなく、同時に複数の場所を検知できることが図 4.6.47 から示された。

(2) 金属線による基礎実験

① 試験目的

(1) で電磁波の伝搬により通信ケーブル内部に存在する異常を検知できることが可能であると判明した。次に、特定のインピーダンスを持たないビニール被覆電線をランダムに配置して、金属導体においても通信ケーブルと同様に、伝搬中の電磁波が反射される現象が測定可能か実験により確認した。

② 試験方法

実験には直径 $0.32\text{mm} \times 7$ 本より線、ビニール被覆で覆われた全長 40m の電線

を2本使用した。送信点から20m位置で芯線を7本から1本まで、1本ずつカットしてゆき、伝搬路に変化を与えた。実験装置図を図4.6.48に示す。また、実験に使用した電線を図4.6.49に示す。電線は特定のインピーダンスを持つ通信ケーブルにならぬよう、床面にランダムに配置した。本試験ではパルス送信機、電線、終端抵抗のインピーダンスを合わせていないので、送信パルスが複数回反射を繰り返す多重反射が発生し、(1)に比べると測定条件が悪い状況となっている。試験概念図を図4.6.50に示す。

③試験結果

試験結果を図4.6.51に示す。パルス反射波の波形はほぼ同じに見えるが、200ns付近を拡大し、芯線7本全てがある状態と芯線を何本かカットした状態の差分をみるとピークが現れた。図の凡例において、6/7は接続芯線数/総芯線数であり、この場合総芯数より1本切断した状態を表している。

(3) 鋼管による基礎実験

①試験目的

(2)において金属中にパルスを送信した場合に、異常部分においてエコーの検出が確認された。そこで、本試験では実際に地中に埋設された配管においても本方法が適用できるか検討を行うため、大気中に静置した鋼管において試験を行い、損傷部分がエコーに与える影響を検討した。

②試験方法

実験に使用した金属管は1000mm×φ32mm、2000mm×φ32mmであり、この管に穴を開け人工的に劣化状態を作り、その試験材に対してパルスを入射し、入射パルスに対するエコーを測定した。実験装置図を図4.6.52に示す。また、パルス発生装置を図4.6.53示す。

試験に使用した鋼管は1m：1本、2m：2本で、それぞれ端面から0.5mのところ穴を開けて模擬的に劣化状態を作成した。そして作成した鋼管を事項の組合せで試験を行った。1mの鋼管では劣化の大きさを変化させ試験を行い、2m鋼管では50cm、1m50cmの位置に劣化がある場合を測定し、4mは2m鋼管を2本結合して測定を行った。