

音波のよもやま話 (その24) 接触媒質について

(補)アイ・エス・エル 宇田川義夫

◆はじめに

非破壊超音波探傷、超音波肉厚計測、医療超音波などで、探触子と相手の材料間の隙間を埋める為に接触媒質が使われている。医療では対象が殆ど肉体の水で接触媒質と音響特性が似ているので、安全性以外議論されない。

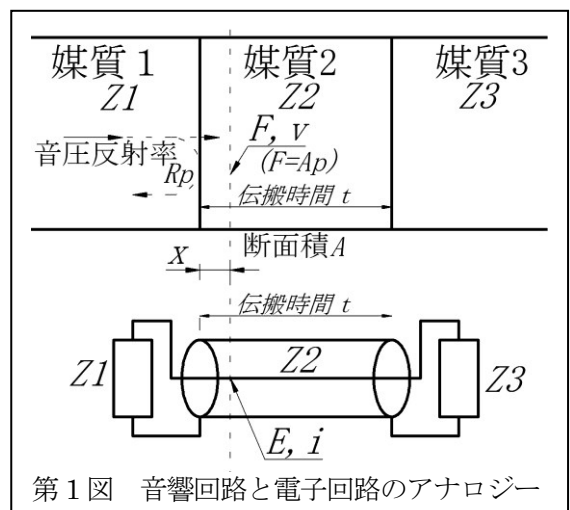
一方非破壊では、相手の材料の種類が多く、それらと、探触子表面や接触媒質の音響インピーダンス、音速が異なり損失や多重エコー、モード変換などが発生する。また鋼の様な金属では接触媒質による腐食の心配をする必要があり、また多孔質の物質では接触媒質が染み込まない事も重要である。検査後の拭き取りのし易さも重要である。接触媒質は目的にあったものを選定する必要がある。この接触媒質の話である。

◆伝送系と音響回路系のアナロジー

接触媒質は探触子と被検査材の間を空気の代わりに埋める液体である。探触子と被検査材の面は完全に平面では無く、何処かで接触しているが、以降理想平面で膜は均一厚さとして話す。薄い膜の中を音波が往復し、その多重反射が被検査材に伝搬し探傷等をする訳である。探触子に戻る時も膜の中で多重反射が発生する。

探傷器内でレシーバ回路のアンプは複数使用され、その間に配線がある。配線の両端は必ずしもインピーダンスマッチングされていないし、マッチングする様に設計しても浮遊容量やアンプの入出力インピーダンスが全ての周波数で抵抗成分とはならないので、理想のマッチング状態ではない。この配線で起きる現象と接触媒質の膜で起きる波形歪は非常に似ている。

元々「音響インピーダンス」と言う言葉は、伝送系での電氣的インピーダンスと類似（アナロジー）の現象が起きるから名づけられたもので、第1図の様に置き換えられる。3種の無限大平面の媒質があって、その一部面積 A を抜き出して書いてある。音波も端が無い無限大の大きさの平面波で媒質境界に垂直に入射する。この一次元近似の場合、インピーダンスはそのま



ま、ある点 x での音圧 p と面積 A の積 pA は電圧 E に対応する。単位断面積を考えれば音圧 p と電圧 E が対応する。その点の粒子速度 v は電流 i に対応する。その他機械抵抗は音響抵抗など、全てのパラメータは置き換えられ、それぞれの関係式も同じ形式となる。例えば媒質1から2への音圧の反射率 R_p の式は電圧反射率 R_E の式と同じである。

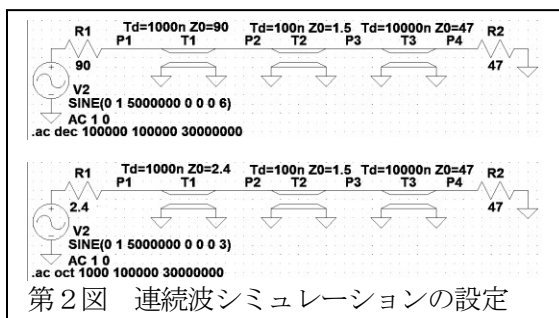
接触媒質,

$$R_p = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} = R_E \text{ 式(1)}$$

任意の音圧波形が媒質1から媒質2に伝わって、更に媒質3に伝わる場合、媒質2では多重反射が起きる。これは電気回路としてシミュレーションできる。半導体メーカが実用レベルのフリーのソフトを公開していて、多くの電子技術者も使っている。LTspiceXVII をウェブからダウンロードしてパルス波に対する応答を計算させてみよう。使い方もウェブに色々あって、それらを見れば1日で使いこなせるようになる。一般的電子回路のシミュレーションは周波数特性の計算ができる。超音波パルサーの動作などもある程度シミュレーションできる。

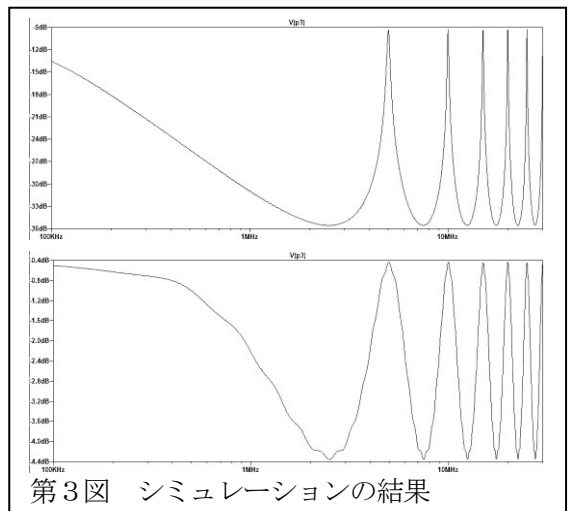
◆LTspice で連続波でのシミュレーション

第2図の様に部品を配置し、周波数特性シミュレーションする。媒質1を保護膜、媒質2を接触媒質の水、媒質3を鋼にしよう。それぞれを伝送ライン(同軸等、T1,T2,T3)で置き換え、各伝送ラインのインピーダンスは接触媒質の音響インピーダンスを使う。水のそれは1.5MRayls であので1.5MΩだが、全ての単位



第2図 連続波シミュレーションの設定

が同じなら結果は変わらないので、1.5Ωと入力した。水膜の厚さは100nsとした。5MHzの半波長相当である。上図は保護膜が直接接触探触子に使われるWC(タングステンカーバイド)の場合、下図は斜角探触子の楔に使われるポリスチレンの場合である。周波数特性は0.1MHzから30MHzまでスイープした。両端は反射しない様に、伝送ラインと同じインピーダンスで終端した。電圧∝音圧なので、水T2から鋼T3に入る境界P3の電圧のシミュレーションをした結果を第3図に示す。入力平面連続波の半周期



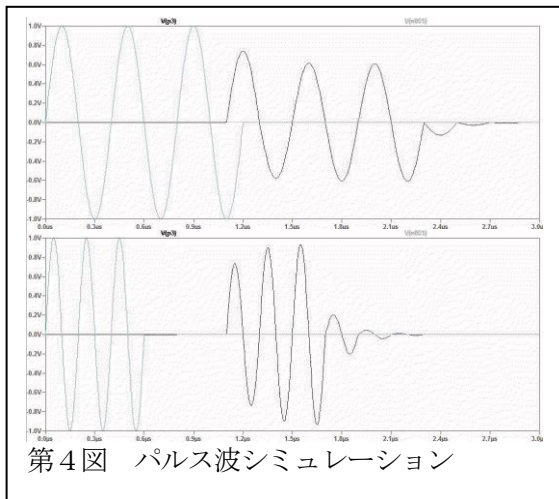
第3図 シミュレーションの結果

の整数倍が水膜厚時間相当になる5MHz、10MHz、15MHzなどで透過量が最大になり、その中間の2.5MHz、7.5MHz、12.5MHzなどで透過量が最低になる。一般に知られた、薄膜の音波透過効率の特性である。第一媒質がポリスチレンの場合、音響インピーダンス水に近いので、良く通る周波数に比べ4dBの信号低下である。送・受信2回通過するので、8dB低下である。一方WCでは27dB×2=54dBとなる。実際の探触子では、5MHzや10MHzでこのように良く通らないし、2.5MHzや7.5MHzの様に低下もしない。パルス波であり、ビームが有限な為と、境界表面性状が理想と異なるためである。また直接接触探触子では部分接触して使うので状況が異なる。あくまで連続波の無限大平坦平面で減衰が無い接触媒質の場合である。

◆パルス波でのシミュレーション

一般に電気回路のシミュレーションソフトでは超音波エコー波形の様な波形は発生出来ないし、その周波数をスイープできない。前述の2.5MHzや5MHz特定の周波数のサイン3周期バースト波でシミュレーションをした。第4図に示す。上段が2.5MHzの場合、下段は5MHzの場合である。左側の薄い波形は媒質1の入力P1の波形である。最初の半波の振幅は2.5MHzと5MHzの何れも同じ振幅である。2.5MHzの場合、次の半波以降薄膜の多重反射の影響で振幅が減る。一方5MHzでは、振幅が増える。

接触媒質,

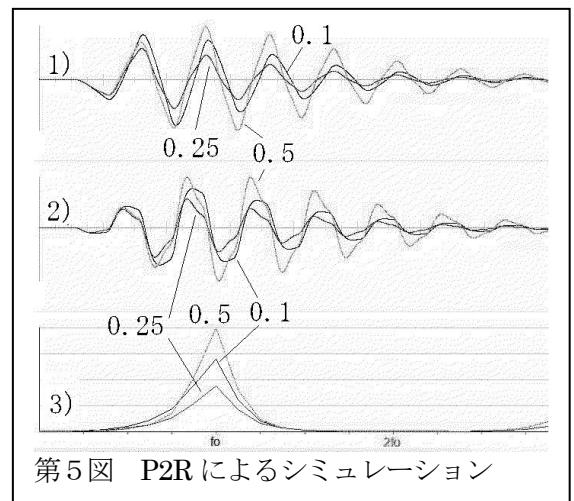


膜をパルス音波が通った場合、波数が少なかったり、先端半波が次に比べ高いと振幅は変わらない事が考えられる。実際よっぽど波数が多い狭帯域探触子以外では殆ど影響ない。影響があるのは連続波の場合、或いは長いバースト波の場合だけで、パルス波の場合余りに気にすることはない。実際自動探傷器などの水ギャップは波長の何倍も隙間を開けていることが多い。隙間が狭ければ非検査材表面のスパッタなどで探触子がダメージを受け、探触子が破損する可能性が増す。隙間が広いと超音波性能は大して変わらない上、探触子の寿命が延びる。

◆P2R でのシミュレーション

前述の LTspice によるシミュレーションでは音波を探触子から出す場合か、音を受信する場合の片方のみのシミュレーションであった。一般には一探触子法が多いし、受信アンプの特性なども加味されていない。そこで以前の連載で紹介した、フリーライセンスの P2R シミュレーションソフトで自動探傷器をイメージして計算してみた。振動子はニオブ系の広帯域用振動子、バックিংは中広帯域用タングステンダンパー、対象は鋼材、保護膜は一般的エポキシで 0.1λ と一般的広帯域用厚さとした。パルサーはスクエアとし、探触子の電気的インピーダンスは市販探触子、即ち 50Ω より少し低い状態にした。結果を第 5 図に示すが、探触子内部に入ってきた音圧積分値(1)とアンプの出力(2)とその FFT 結

果(3)を示す。 0.1λ と水ギャップが小さな場合、連続波の場合に透過損失が一番小さな 0.5λ ($\lambda/2$) の場合、透過損失が一番大きな 0.25λ ($\lambda/4$) の場合の 3 種である。水膜を送信と受信時に二回通過するが、それでも振幅の差は倍半分程度である(片道では 30% 程度しか変化しない)。連続波の場合の第 3 図の様に極端な変動は現れない。



◆研究室で使われる接触媒質

研究で探触子を使うとき、接触媒質は使用前に表面に塗布し、後で拭き取るが、表面性状に何の影響も与えない事が重要である。10 年後に表面が変色したなど、長い期間を経ないと影響しないかどうか判らない。その為古くから使われていて、問題情報が無い接触媒質を使うのがよからう。

米国で ULTRAGELLII という半世紀まえから使われているゲル状の接触媒質がある。多孔質対象物でも染み込みにくい。今のところ問題があったとの情報は無く、航空機部品の検査仕様に適合した接触媒質となっていて、検査仕様書に指定されている事も多い。ハロゲン類(フッ素ヨウ素塩素など第 17 族)が 50ppm 以下と少ない。現在はさらに安全性を高めた SoundSafe と呼ばれる製品が航空機関連の指定接触媒質になっている。

これらの接触媒質の欠点は音響インピーダンスが 1.8MLayls 低い事である。低いと言っても

接触媒質,

大抵の接触媒質は水 1.5MLayls 程度である。粘度は 80kcps 程度で垂直の壁でも落下しない。音速も 1600m/S と水に近い。コンポジット材を対象にした場合は良いが、金属材料対象だと透過損失が多い。コンクリートなどを対象にした場合、後述する HZ とは雲泥の差となる。

◆接触媒質使用での安全対策

接触媒質を顕著に使う、現場での検査、探触子製造ラインでの出荷検査などでは、多くの国ではゴーグルと手袋を必修としている。日本ではこの片は無頓着である。確かに温度、湿度の高い夏場の日本の環境ではゴーグルと手袋では作業が大変である。日本で接触媒質としてグリセリンが多用されているが、国によるが海外での使用は少ない。グリセリンは生物内生成されているものではあるが、濃度が高いと皮膚炎など起こすことがある。各接触媒質メーカは安全データシート (MSDS) を接触媒質に添付又はウェブ閲覧できるようにしているので、これをよく読んで安全性への配慮が必要である。海外では特に医療用の接触媒質を生産している接触媒質メーカではロット毎に安全性を確認して certified test report を発行している。フッ素、ハロゲン、硫黄等成分の含有量を確認できる。

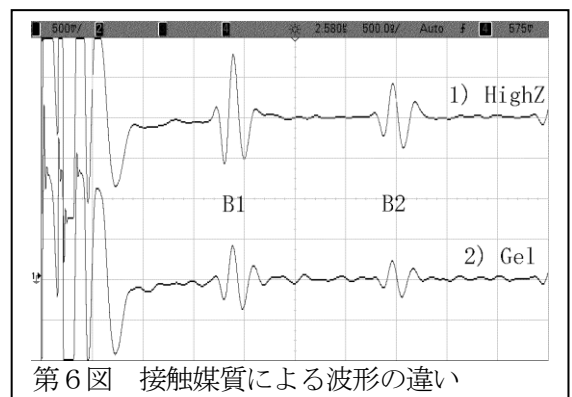
◆遅延材用接触媒質

精密超音波肉厚計では遅延材が付いたタイプが使われる。遅延材の材料はポリスチレン系である。これを使う理由は、音響インピーダンスが樹脂の中では低く (水、油など接触媒質に近く)、超音波の減衰も低い。20MHz を超える周波数まで使える。水、油など接触媒質の厚さ変動による波形歪も少ない。1 ミクロン単位で測定する高性能な精密肉厚計では接触媒質による波形歪が問題になる。接触面積を小さくすると、対象材表面に凸凹があっても接触媒質は極薄くほぼ一定厚になるので、測定精度がよくなる。先端径が 1mmΦ の遅延材を使った肉厚計も販売されている。一方先端径が小さいと探触子の非検査材に対する垂直度を保つのが大変だし、先端の摩耗劣化も多い。そこで、音響インピーダンスがポリスチレン程度で且つ音速もそれに似

た接触媒質があれば、上記諸問題が解決する。こう言った経緯により米国ブランソン社で開発されたのが HIGHZ と呼ばれる接触媒質である。現在は他社からも同様な製品が販売されていて以降 HZ と記す。グリセリンに珪砂を溶かしたものである。ポリスチレンはグレードによるが音速は 2300~2500m/S、音響インピーダンスは 2.4MRayls 程度である。HZ のそれらは 2600m/s と 3.6MRayls である。グリセリン自体もポリスチレンに近い音響インピーダンスだが、大気中の水分を吸収して音響インピーダンスが即座に下がり好ましくない。実際 HZ を使うとポリスチレンと接触媒質間の境界エコーがほとんど観測されない。グリセリンは空中の水分を吸うので使用時点では多少実質音響インピーダンスは下がっていると思われる。

コンクリート表面の音響インピーダンスはポリスチレン同程度で、HZ をコンクリートの検査の接触場室に使うと頗る SN が上がる。

鋼材でも平らな粗さの小さな対象では大差ないが、表面粗さが荒いグラインダー面などでは SN が異なる。検査できないものができてしまう事がある。パイプの腐食肉厚測定で探触子がパイプに綺麗にフィットしない場合も効果がある。第6図はグラインダー仕上げ面から厚さを



測る場合の波形の差を測定したもので、下波形が通常のゲル状接触媒質、上波形が HZ を用いた例である。HZ ではバックエコーの振幅が大きくなると同時に、グラウンドノイズが減って SN を良くしている。探触子内で発生した音が即座に外に出ると、探触子内ノイズエコーが減る為ノイズも減ると考えられる。これと同じ現象

接触媒質、

がコンクリートなどの複合材でも起きている様で SN の改善が 10dB を超える事もある。SN がほぼゼロの状態から 10dB の改善は画期的で、出来ない検査ができるようになるのである。同じ意味では保護膜の種類、厚さを変えることにより SN の改善がされることも多い。保護膜は探触子メーカーが単独で選定することが多いが、議論の余地が多くある。

◆高音用接触媒質

プラントの現場検査では、稼働中の高温状態で配管の腐食など検査のニーズがある。温度は 300℃を超え 500℃の事もある。

高音用接触媒質の温度範囲には基本的に 2 種ある。一つは特定の温度範囲で機能するもの、他は比較的広い範囲で機能するものである。

一方肉厚測定のように一点で測定する場合と、探傷のように探触子の走査をする場合で、特性や温度範囲が異なる。

材料的には二種の接触媒質あって、一つはシリコン系オイルの様に広い温度範囲で液体のもの。他は一定の温度で個体から液体に変化するものである。良く使われるのは塩で、塩の融点は単体では 800℃であるが、他の物を混ぜると 500℃程度から溶ける。常温でも扱いやすいように個体の塩と気化する液体などを混ぜたものが市販されている。

高温材の実温度を測定するのは難しい。表面は大気などの対流で冷却されている。探触子を付けた直後は接触媒質で更に冷やされるし、探触子の熱容量が大きいとなかなか表面温度が上がらない。一方長時間接触させていると、赤外線温度計などで測った温度より接触面温度が上がる事もある。測定した表面温度は接触媒質選定の目安程度で、実際に接触媒質を付け、探触子と材料間に小さな熱電対を差し込むなどして温度を確認する必要がある。

垂直壁を検査する場合は、接触媒質が垂れて検査できない事も多い。高温でも粘性の高いものを、一ランク上の高温用を使うなどの必要がある。表面張力の変化で、広がるもの、自重で垂れるものがある一方、ゲル状接触媒質の様に一定温度まで形を保持しているもの、など

色々で、実際に使う用途に合わせて数品種を試行錯誤する必要がある。

◆高音用接触媒質を使わない高温での検査

高温の検査で高音用探触子を使わないと不味いかと言うと、必ずしもそうで無い。連続的に高温体に接触する場合は、探触子を冷却するか、高温に耐える探触子を使う必要がある。高温に耐える探触子は概して性能が悪い。常温用探触子を冷却する方法で対応する方が無難だ。常温用探触子も広帯域の物は温度での波形変化が大きいので、性能を優先の場合は探触子全体を常温に保持する必要がある。

遅延材を交換しているタイプの探触子では、高温対応の遅延材が売られている。プラスチックの遅延材や保護膜付の探触子を高温で使う場合、単に PEEK、ポリイミドや BPI など高温に耐える樹脂を挟んで検査もできる。この挟むものを一般にバッファと呼んでいる。金属の直接接触用探触子の場合は、厚い熱伝導の悪い磁器を挟んで検査もされる事がある。むやみに高温用探触子を使うより性能が高い事が多い。1000℃を超える高温での超音波実験ではアルミナやサファイヤの棒をバッファとして使う。2000℃を超える場合はタングステン棒を冷やしながら使う。これら 1000℃超えの高温の場合の接触媒質は高温で液体の金属を使う事が多い。

半自動探傷器で、航空機、原子力などの分野では水の他接触媒質も使われるが、自動探傷などでは大量の接触媒質が必要な事から、コストの安い水を接触媒質として使っている。水は常圧では 100℃が沸点である。気化熱が非常に大きいので、真っ赤な高温の比熱の小さな鉄に水を多めに掛けると、鉄は熱伝導が悪いので表面温度は簡単に 100℃以下に下がる。探触子は水で冷やされるので、探触子の温度も上がらず、250℃超えの鉄鋼の探傷ができる。温度が下がらない場合は少し前で蒸気を当てて冷やし、その後探傷する。水で冷やすと、熱いフライパンに水をかけた状態と同じで、水玉になって表面を転がるだけで接触面積が小さいので冷却効果が無い。水は 400℃程度までの鋼材に対して間

接触媒質、

題なく自動探傷器の接触媒質として使われている。

圧力が上がると水の沸点は下がる。二気圧になると 120℃が沸点である。沸騰ギリギリの場合、沸騰を避ける為圧力を上げることもあったが、圧力の効果か水量増加による冷却の効果が何れが原因かわからなかった。

◆横波用接触媒質

通常の探触子からは縦波が出る。斜角探触子は大抵、縦波を探触子から出して、媒質との境界で横波に変換する方法を取る。接触媒質の音速は探触子表面材より遅いので、接触媒質中は縦波のままである。屈折を利用した横波発生は振動方向が境界面に垂直に近い SV 波が発生する。振動方向が境界面に平行な SH 波はコーナー反射などでモード変換がほぼ発生しないことから利用価値がある。この場合横波を発生する振動子（滑りモード）が用いられ探触子の中から横波が出てくる。横波を良く伝える接触媒質が必要になる。鋼材は圧延方向で音速が異なり、斜角探傷では補正が必要な場合がある。この場合横波垂直振動子で一定の方向に振動させ、その振動方向に対する音速を測ることが行われる。これら横振動を伝える為には粘性の高い接触媒質が使われる。水飴やハチミツは人に安全で良い接触媒質となる。市販の横波用接触媒質も売られているが、水飴ハチミツ同様温度に因る粘性変化、透過損失感度変動が激しい。

◆拭き取りの確認のできる接触媒質

検査後接触媒質はそのまま放置される場合もあるが、大半は拭き取る。拭き取り残があって、後日材料表面に何等かの影響を及ぼす場合もある。この様な場合、拭き取った状態を確認する為、蛍光塗料を含む接触媒質がある。ブラックライトを当てると、接触媒質が傾向を発するので、拭き取り状態の確認ができる。

◆濡れ性の改善剤

接触媒質の濡れ性が悪いと、音が通らない。市販接触媒質は濡れ性の高い材料が使われるが、それでも上手く濡れない材料もある。また、水を接触媒質に使う場合、撥水性の表面で気泡が

付いた状態になる場合もある。これを避ける為表面活性剤が必要となる。通常は中性洗剤など使えば対処できるが、安全性や材料に対する影響を確認された非破壊専用のものが売られている。

◆接触媒質の超音波機器への染み込み

接触媒質を使った手で、探傷器の本体側のコネクタを触ったり、不用意に接触媒質を機器に着けると、染み込む場合がある。多くの接触媒質は導電性で、基板等に付着すると誤動作の原因になる。接触媒質は乾燥するものが多い一方、潮解性のものもある。日本は湿度が高く、冬場など乾燥している時期は、旨く動作してきた機器が、梅雨場に使うと乾いていた接触媒質が湿気を吸って、動作異常となる事が多い。接触媒質の染み込みによる故障がかなりの部分を占める為、接触媒質の掃除が探傷器や肉厚計の修理屋の主な仕事と言う時期もあった。現在は IC 化が進んで回路修理できなくなったため、基板清掃もしないで、基板や部品の丸ごと交換で対処している。

◆あとがき

今回接触媒質の話をした。接触媒質を変えただけで、まるっきり異なる結果になる事も良くある。超音波特性の異なる数種の接触媒質を手元に置いて、何かあったら使ってみる体制が重要と思う。

◆今回知った事

- (1) 音の一次元モデルは電子回路のシュミレーション・ソフトである程度解析できる。
- (2) パルス波に対する接触媒質の厚さの影響は、連続波ほどない事が判る。
- (3) 使う接触媒質の種類により感度の改善ばかりでなく、SN も良くなる。
- (4) 同様に保護膜の種類を変えると SN が良くなる。
- (5) 高温用接触媒質の選定には試行錯誤が必要。

接触媒質,

- (6) 高温の検査対象材の表面温度の測り方には工夫が必要。
- (7) 探触子と非検査材の間に高温に耐えるバフファを入れるのも一案。
- (8) 水でも 100℃を超える検査の接触媒質として使われている。
- (9) 横波を伝える場合粘性の高い接触媒質が使われる。粘性の温度変化が激しいので注意。

<参考文献>

超音波技術入門—発信から受信まで(2015/04初版2刷、日刊工業新聞社)

- ・
- ・