

原点から考え、NDMに貢献する。

Non-Destructive Measurement

Imaging Supersonic Laboratories Co.,Ltd.

Home-page:<http://www1.kcn.nc.jp/~isl/> or <http://www.i-sl.co.jp> Email: isl@kcn.nc.jp

有限会社 アイ・エス・エル

〒631-0063 奈良市帝塚山中町12-7

TEL:0742-40-2345 FAX:0742-40-2346

アレイ方式のSN

アレイ方式は簡単にビームを絞ったり振ったりできる反面SNが必ずしも良くない。SNを通常探傷器と単一振動子と比べてみる。

電氣的SNと超音波的SNに分けて考える。まず電氣的SNに関して述べる。以下厳密な計算は探触子のインピーダンスの周波数特性が関与するが複雑なので、振動子=容量として説明する。振動子の主要な部分は電極間容量で通常、厳密なインピーダンスを使わなくても倍半分程度の範囲で合う。

アレイ関係に標準的設計仕様と言うものが確立されていなく、それぞれの装置、アレイ探触子で以下の内容を再検討する必要はある。

話を簡単にするため、探触子としては10x10mmの5MHz単一振動子とこれを16分割したアレイ探触子と比較する。

1) 送信電圧

アレイ装置は一般に送信電圧は低い。これには2つの理由がある。1つ目は大きな電圧の送信回路はスペースを要するので、一定のスペースに組み込むのが大変であるし、コストが掛かるからである。一部の原子力用の装置で500Vを実現しているが、これ以上は実現していない。通常は200V前後である。コストダウンの為に、医療用の専用の小型ICを使う場合は200V以下になる。一方探傷器では、昔は1000V以上であったが、現在は、それほど高い送信電圧を必要としないので350~500Vのものが多い。送信電圧と送信音圧は比例するので、アレイは音圧で概略半分程度しか送信できない。

2) 送信インピーダンス

通常探傷器の送信回路の出力インピーダンスは50Ω以下、通常20Ω前後である。長い同軸ケーブルを駆動したり、低インピーダンスの探触子を駆動できるように低く設計している。一方アレイ装置では送信インピーダンスが高い。200Ω前後が多い。複数の送信回路が働く為、通常探傷器の様に低いインピーダンスにすると電力消費が膨大になるからである。例えば原子力用のアレイ装置では500Vで50Ω以下のものがあるが、高圧電源だけで1kWもの電力を消費し、装置のサイズが大きくなる。発熱も激しい。同軸ケーブルは50Ωであり、1m当たり約95pF程度の容量を持つ。このインピーダンスの高さが、探触子ケーブルを伸ばした場合に急激に送信感度を下げる。2m程度

なら良いが、数十 m となると 1/10 の音波信号強度となる事も少なくない。簡単な計算を示せば 10m の同軸は、容量では 950pF である。950pF は 5MHz に於いては約 35 Ω である。従って、5MHz では同軸を付けただけで送信電圧は $35/200=0.175$ 倍に下がってしまう。

3) 同軸と振動子のインピーダンス

振動子のインピーダンスは振動子素材とその周波数による。標準的 10x10mm5MHz では電極間容量は 2000pF 前後が多い。これは 16Ω 程度で同軸 50Ω より低い。通常の探傷器の送信回路の出力インピーダンスが低い理由でもある。16Ch にアレイ状に分割すると単純計算で $16\Omega \times 16=256\Omega$ となる。切断すると隙間があるので実際には少し大きくなる。アレイの送信インピーダンスを 200Ω 前後にする理由の一つでもある。5MHz の同軸内の波長は $200\text{ns}/4.5\text{ns}=44\text{m}$ ですので、これ以上に長いケーブルの場合、探触子から見ると同軸はその特性インピーダンス 50 と同じと考えてよいので、通常探触子の場合には圧電素子に加わる電圧は $16/50=0.32$ 倍に下がる。一方アレイの場合はほとんど変化ない。ただし、単一振動子で 40m と言った長い場合はめったにない。

4) 同軸の直流インピーダンス

探触子ケーブルに使う同軸は、単一探触子では RG174 や 1.5D2V などが使われるが、どれを使っても芯線の抵抗は 1m 当たり 0.1Ω を超えることはなく、よっぽど長くない限り無視できる。一方アレイ用のケーブルは 1m 当たり 1(AWG36)~5(AWG41)Ω のものが使われる。AWG41 など細ければ 128Ch でも全体が 6φ 程度に収まって取扱いが便利である。しかし、例えば 10m のケーブルで $5\Omega \times 10=50\Omega$ となって、送信時及び受信に信号減衰の原因になる。

5) 受信音圧と電圧信号強度

圧電素子は変位（内部圧力に比例）に比例した電荷を発生する素子である。音圧が同じなら、単一の大きな振動子でも、分割されたアレイ素子でも同じ電圧が発生する。

6) 同軸と発生電圧

しかし、探触子ケーブルがあるために、同じ電圧とはならない。前述のように 10×10mm の振動子の容量は 2000pF 程度で、探触子ケーブルが例えば 2m の場合 $95\text{pF} \times 2=190\text{pF}$ が探触子容量に負荷される。単一振動子の 2000pF が 2190pF に増えても同じ音圧を受ける事による電荷発生で、電圧は 10% さがるだけである。(V=Q/C V:電圧、Q:電荷、C:容量) 一方アレイでは単純計算で $2000\text{pF}/16=125\text{pF}$ に 190pF が付くので半分以下の発生電圧になってしまう。4m であれば 1/4 となる。アレイ探触子がケーブル長さに敏感な理由はここにある。アレイの探触子ケーブルを延長する場合は、この影響で 1/10 に信号が成る事も多い。注意が必要である。太いケーブルにしても、同軸の容量は変わらないので感度低下は変わらない。(同軸はメーカーや種類によって差があり、特性インピーダンスが 50Ω のポリエチレン絶縁同軸の場合大半 90~100pF/m の範囲であるので、95pF/m とした)

7) 熱雑音ノイズ

平均化処理しなければ、電氣的信号の SN を決めるのは熱雑音である。アレイは単一振動子に比べインピーダンスが高い分熱雑音が大きくなる。16分割した場合、インピーダンスは16倍になる。電圧熱雑音は $\sqrt{4KTBR}$ なので、ノイズは4倍となる。前述のように同じ音圧による電圧信号強度は面積に依らないので16分割アレイの SN は単一振動子の1/4となる。

8) 外来電氣ノイズ

アレイの素子のインピーダンスが高い分素子で誘導ノイズを受けやすいが、一方素子面積が狭い分誘導は弱くなる。結局単一振動子と差異はないと考えられる。十分位相制御して加算する場合、超音波信号は加算され、ノイズは加算されない状態となり、外来ノイズに強くなる。しかし、モータなどの外来ノイズは比較的low周波&長く続くので、前述の様になるとは限らない。外来ノイズは同軸のシールド効果や探触子のGNDの取り方によって大幅に変わるので、同じ同軸を使っているわけでないし、探触子の大きさも異なるので、どちらが有利かは一概に言えない。単一振動子の場合、ケースのサイズが大きいと、ケーブルの先端に大きなアンテナがあるような状態になって、来ノイズを受けやすい事は事実である。アレイの場合素子数が多く、ケースが大きくなる場合が多いので、外来ノイズには気を付けた方が良い。

9) アンプの入力インピーダンスと熱雑音

(ダンピングを除いた)アンプの入力インピーダンスが信号源のインピーダンスに一致する場合 SN が最良になるが、通常探傷器でもアレイでも汎用性を考えて高めに設計されている。通常探傷器とアレイの装置とも同じ様な特性の IC を使っており大差ない。

10) アンプと同軸のインピーダンスと微分作用

探傷器はダンピングと呼ばれる抵抗で、受信時の微分作用を調整できる。ダンピングを利かさないと即ち入力抵抗大きくすると音圧に近い電圧波形が得られる。通常の探触子のインピーダンスが同軸より低いものも多く、受信音圧波形に比較的近い電圧波形を増幅することになる。ダンピングの最少値は10から20Ωのものも多く、ダンピングを強く掛けると探触子によっては強く微分される。アレイの場合は多くの場合、素子のインピーダンスが高いので、同軸ケーブルが波長より長いと強く微分された波形になる。アンプにはダンピング機能が付いたものは極一部である。ダンピング機能が付いていないものは大半の装置が素子のインピーダンス前後の入力インピーダンスであるので少し微分された電圧波形を増幅することになる。微分されると音圧波形とは異なる波形になって、信号の振幅は音圧の傾斜、信号の傾斜は音圧の振幅に相当することになる。また、同時励振素子の両端の素子での受信波形はBE拡散波の影響を受け所謂「角」が強く観測される事もある。励振素子数より受信素子数を少なくしてこの影響を避ける場合もある。

11) 加算処理と熱雑音

アレイではそれぞれの振動子から入ってきた信号を合成する。通常は位相をずらして単純加算である。N 回単純加算すると \sqrt{N} だけノイズが減るので前々項で増えた熱雑音は単一振動子と同じとなる。逆に単一振動子では振動子の中で加算平均化しているとも言える。

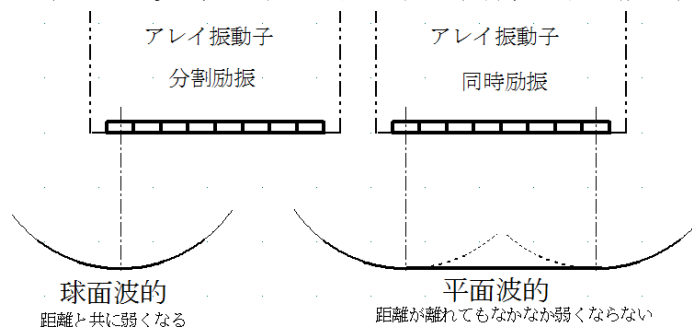
以上全体を眺めると、アレイの方が電氣的 SN 的に不利な事が多い。

超音波的な SN

- 1) アレイ状に並んだ振動子を同時励振すれば、単一振動子とほぼ同じ音場が得れる。通常の単一振動子は、ミクロで見れば多くの不均一があるが、マクロに見れば均一である。アレイは波長より十分狭いピッチで並べれば同時に励振すれば、単一と考えても良い。
- 2) 実際には素子間の音圧は少し低く、その分 BE 拡散波が多くなる。この量は水中で 5MHz の場合 0.5mm ピッチ以下であればそれほど気になる強度では無い事が経験的にわかっている。ただし、高感度な探傷の場合、単一振動子であっても粒界の細かな振動子の方が、SN が良い。コンポジット振動子は感度が高いものの高感度探傷では SN が単一振動子に比べ悪い。振動子内部の散乱などにより SN が低下していると思われ、アレイの場合はそれ以上に悪くなる。
- 3) 位相制御して励振する場合、隣り合う素子間位相差を十分小さく（波長の 1/10 以下）にすれば、あまり不要な BE 拡散波は発生しない。（これも高感度探傷では注意が必要である。）
- 4) 同時励振と分割励振

アレイの 1 素子を励振して、1 素子で受信し、これらをあらゆる組み合わせで行った結果の波形を合成するのがアレイ装置と考えている人もいるが、実は違う。ほぼ同時に複数の振動子を励振することが味噌である。1 個の素子を励振する場合、振動子幅が狭いので、幅方向での拡散が激しく、振動子から出た音は直ぐに円柱波になる。2 次元アレイの場合は球面波になる。円柱又は球面波になると距離が離れると急激に音圧が下がる。一方複数の素子を

ほぼ同時に励振すると、前述のように通常の単一振動子の平面波的波が発生し、近距離音場限界の数倍まで比較的良く音圧が保持される。（位相制御しフォーカスする場合はフォーカスする方向での球面波となって、距離と共に強度が増す。フォーカス探触子と同じである）音は波面の左右の端から拡散するので、同時に複数励振すると、中



ほぼ同時に励振すると、前述のように通常の単一振動子の平面波的波が発生し、近距離音場限界の数倍まで比較的良く音圧が保持される。（位相制御しフォーカスする場合はフォーカスする方向での球面波となって、距離と共に強度が増す。フォーカス探触子と同じである）音は波面の左右の端から拡散するので、同時に複数励振すると、中

央の平面波部分の音圧がなかなか低下しないからである。中央付近が拡散しない分音圧が高くなる。その為、どのアレイ・メーカーも同時励振出来る数を多くする設計をしている。多くなりすぎると電力消費の関係で不利になるので、目的に合わせて同時励振数を決めている。(メーカーのカタログなどにはアレイの説明をするため、分割励振を重ね合わせた図を示すことが多いが、実際は異なり誤解を生む。また、一部のシミュレーションソフトも同様に間違ったアルゴリズムを使っていて実際と合わない)

5) 音波受信時の分割

音波の受信時には分割したアレイで受信して、それを電氣的に加算合成しても、同じ等価形状の振動子の内部で電氣的に加算合成しても結果は同じである。現在、応用は見られないが、アレイの場合加算する際にウェイトイングさせることができるので、何らかのメリットがあるかもしれない。

以上から上手く制御すれば、高感度探傷を除き、超音波的には余り差異はないと考えられる。強くフォーカスしたり、大きく振るなど上記の条件を十分満たさない場合には、よりSNが劣化すると考えられる。