

探触子内妨害エコー,散乱エコー,タングステン・バックキング,シュー内エコー,コーナー反射,楔の材料,多重反射,遅れエコー,ケースからのノイズエコー,電氣的フィルター,コンポジット振動子のノイズ

音波のよもやま話 (その38)

探触子内妨害エコー

Internal Echo of Transducer

(補)アイ・エス・エル 宇田川義夫

◆はじめに

非破壊探傷器、超音波肉厚計や超音波実験用パルサー・レシーバ(以降[探傷器等])と市販探触子との組み合わせの一般鋼材の探傷では SN 比の良いエコー波形が観測される。実は探触子の振動子端子に直接オシロスコープに繋いで観測したり、振動子面に戻ってきた音波波形を別のセンサーで観測すると SN 比はそれほど良くない。探傷器や探触子メーカーの経験や試行錯誤で、色々な細工をすることにより、SN 比を良くしている。非破壊機器を使っている検査技術者や研究者には殆ど知られていないが、探触子や探傷器等を設計する人には必要な事柄を述べる。鋼材など以外の一般に探傷が困難な材料を検査する場合には、検査技術者、研究者にも必要な知識である。以降述べる話を応用すれば従来困難な多くの検査試験が可能になる。

◆探触子内ノイズ除去の基本

探触子内のノイズ・エコーを小さくする方法は、探傷器等のアンプに繋がる受信振動子にノイズ音が入っても、エコーとして観測されない様にする事である。その方法は

- 1) 実質振動子入射音波音圧合計をゼロにする。
- 2) 入って来た音波波面と振動子面と角度を持たせ、振動子からの発生電圧が低い周波数に推移し、アンプで増幅されない様にする。
- 3) 音をより低周波の音に変換し、前項同様アンプで増幅されない様にする。

◆エコーに現れるノイズ

探傷器等の画面にエコーとして現れるノイズの分類をしておく。

- 1) 熱雑音、電氣的ノイズ
- 2) 検査対象の形状等当然発生するエコー
- 3) 大きな不連続部からのノイズ・エコー
- 4) 探触子に起因するノイズ

熱雑音はアンプの入力抵抗など電氣的な部品から発生するノイズが多い。半導体は抵抗より大きな各種ノイズ(1/f ノイズ、ショットノイズ)を発生する。熱振動=音が探触子の圧電素子に伝わると、当然受信されノイズ電圧となるが、振動子が原子サイズより遥かに大きいので電氣的熱雑音より極小さく、計測される事はまずない。

次は検査対象のコーナーやモード変換した形状で発生するエコーで、波形上で分離できない場合は、探触子側の帯域、屈折角、フォーカス等の仕様を変更する必要がある。

有害な欠陥とまでは言えない小さな欠陥など不連続部からエコーが、特に球界が大きい材料ではノイズ・エコーとなる。一般には「散乱ノイズ」と呼ばれるものだが、音波が散乱すると考えると、ニュートン力学に反する。より正確には小さな不連続部からのエコーと呼ぶべきであろう。小さな無視できる欠陥と言える。

最後は探触子自体の持つノイズである。探触子が真空中に置かれたと仮定すると、振動子から前後に発生した振動(音)は、慣性力保存則から消える事は無く永久に存在する。探触子内部を伝搬すると屈折やモード変換して波が幾つも似分かれ、受信時に波面が振動子面と平行

探触子内妨害エコー,散乱エコー,タングステン・バックキング,シュー内エコー,コーナー反射,楔の材料,多重反射,遅れエコー,ケースからのノイズエコー,電氣的フィルター,コンポジット振動子のノイズ

には成らなくなるし、波長も変化し、受信信号としては弱くなる。音のエネルギーや慣性力は減衰しないが、あたかも減衰したかのように「観測」される訳である。この受信信号を如何に早く弱くするかが今回の話である。

◆電氣的妨害エコー

非破壊検査の本には余り電気ノイズの話が出てこないの、電氣的ノイズの話をする。ノイズ・エコーには振動子が音波を受けて発生した信号の他、電氣的ノイズが含まれている。電子回路から発生する電気ノイズは低周波では周波数に逆比例する $1/f$ ノイズが主だが、MHz 帯を使う非破壊超音波の場合は、周波数に依存しない熱雑音が主である。周波数に依存しない為、白色光に似るのでホワイト・ノイズとも呼ばれる。探傷器の画面上では、探傷機と探触子含めた帯域の為周波数に依存する。この他に増幅型半導体で発生する電子の数の少なさ故のショット・ノイズなどが有る。

通常探傷器メーカーは探触子や探触子ケーブルを繋がない状態で、熱雑音を含めたホワイト的ノイズが画面の 10%程度以下に成るように設計する。電気ノイズはアンプ等半導体から出るノイズの他、電源回路からやデジタル型の探傷器では AD コンバータの非直線性から発生するノイズ等がある。アンプ入力には必ず熱雑音が発生していて、平均化処理を行わないリアルタイム計測では、これが計測限界をとる。熱雑音平均値 $e(V)$ は抵抗値 $R(\Omega)$ と計測帯域 $B(Hz)$ から以下の式で計算される。

$$e = \sqrt{4kTBR} \quad \text{式 (1)}$$

ここに k はボルツマン定数 ($1.38 \times 10^{-23} J/K$)、 T は絶対温度である。電子等の熱運動量は当然温度比例であるので、温度は低い方がノイズは小さい。暗い天体観測用の CCD カメラは冷却する事が多いが、その理由である。

試しに計算する。探傷器等の設計は 50Ω 系が多い。アレイ装置などでは 200Ω 程度で設計する事もある。一探触子法でダンピング抵抗を 50Ω に設定し、探傷器等の帯域の代表値 $10 MHz$

とすると常温 $300K$ の熱雑音ノイズ e は約 $3 \mu V$ である。探傷器等の機種によるが、等価入力熱雑音を実測すると $10 \sim 200 \mu V$ と理論ノイズ $3 \sim 70$ 倍 ($10 \sim 37 dB$) 程度で機種差が大きい。BS や CS 用の初段アンプの SN 比 (専門用語では CN 比) は $1.2 dB$ 以下、即ち理想抵抗の熱雑音と殆ど変わらない。探傷器のアンプの場合、パルサーの高電圧保護や原理的にインピーダンスのマッチングを無視せざると得ない構成などの為、それぞれの探触子専用のアンプとしないと SN 比を下がられない。その為、高い SN が必要な場合、探触子の中にアンプを組み込んだアクティブ型探触子が使われている。

熱雑音はランダムであるので、平均化処理すると SN を良くする事ができる。平均化数を n とすると概略熱雑音は前式の $1/\sqrt{n}$ となる。平均化処理機能を組み込んだデジタル探傷器もある。単純平均化では実質 PRF が下がるので、機種によっては移動平均化処理をして画面の応答を改善している。

電源ノイズ等回路からのノイズも多くは平均化処理で小さくなるが、PRF に同期したスイッチング電源が原因のノイズ等では、平均化してもノイズが下がらない場合が多く、ノイズ源回路の周波数を PRF には同期させない設計とするのが一般的である。

余談ではあるが、超音波肉厚計は肉厚分解能を上げる為、計測した TOF (伝播時間 Time Of Flight) の分解能元々 $0.1 mm$ 程度を 100 回以上の平均化して実質 $0.01 mm$ の分解能としている。この場合も平均化効果が表れるよう、PRF と TOF 計測回路は同期しない様に設計している。同期すると、 $0.1 mm$ ピッチの非線形凸凹が表れる。

探触子ケーブルは $5 MHz$ 程度の場合約 $2m$ が標準となっている。これはケーブル両端の電氣的多重反射信号の影響が少なくなる事から決められた様である。 $50 MHz$ の探触子を使う場合は $20 cm$ と短くしないと、ケーブル内電氣的反射がノイズとなり検査の邪魔となる。

探触子ケーブルが長いと、外来ノイズを受けやすい。近くにある溶接機やスイッチング電源

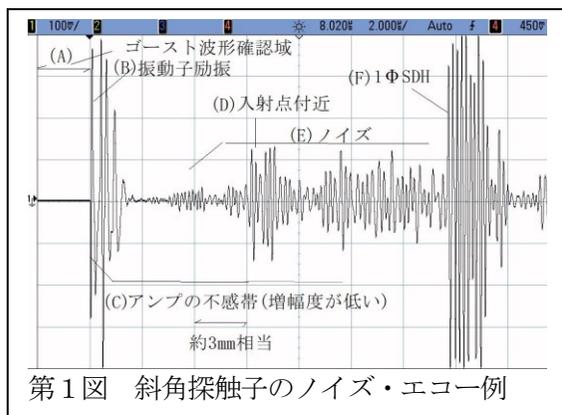
探触子内妨害エコー,散乱エコー,タングステン・バックキング,シュー内エコー,コーナー反射,楔の材料,多重反射,遅れエコー,ケースからのノイズエコー,電氣的フィルター,コンポジット振動子のノイズ

からのノイズを受ける。これを除く為、探触子ケーブルを短くするリモート・レシーバ（又はリモート型パルサーレシーバ）が用いられる。簡単に数十 dB の SN 比の改善が出来る。

二探触子法やマルチチャンネル探傷で、探触子ケーブルが長い場合、送信電圧や強い受信エコーが他のケーブルに漏洩（クロストーク）しノイズとなる事もある。シールド性の高い、二重シールドや金属フレキシホースに包まれたアーマード・ケーブル等で改善する。

◆斜角探触子のノイズ・エコー

第1図に市販 5MHz70 度横波斜角探触子をパルサーレシーバに繋いで、可成り感度を上げたエコー波形を示す。図右端に(F)の1Φの横穴の飽和した反射エコーが観測され、0.1Φ程度の横穴ならノイズ(E)に比べ十分高いエコーとして検出できる。微細なブローホールなどを検出しようとする、(E)のノイズが邪魔になる。探触子の入射点は(D)付近で、その前のノイズが小さいが、これは一探触子法では大きな送信



第1図 斜角探触子のノイズ・エコー例

振動子励振電圧によるアンプの追い込み現象が発生している為で、完全に増幅度の無い場合不感帯と呼ぶ。実際の音響ノイズはエコー波形の様に小さいとは限らない。送信波に限らず大きな信号でアンプが飽和している直後例えば(F)の後には、同様にエコー振幅が正しい受信音波振幅ではない可能性がある。正しい振幅を観測するには直前の波形が飽和しない状態で観測する

必要がある。(E)のノイズは試験体との接触を外すと、高くなる場合と低くなる場合がある。実探傷で低くなる接触媒質を選定する等が重要である。探触子ケーブル長さを変えると変わる事もある。

図の波形では表示範囲左端を励振タイミングや入射点に設定はしてない。基礎試験の場合は、前の PRF サイクルで発生した音が、次のサイクルで観測される、所謂ゴースト・エコーが計測評価に影響しない様にする必要があり、(A)の部分を観測し、何も観測されない事で前サイクルの影響がない事を担保している。大きな鍛造鋼材の探傷例えば角ビレットの垂直探傷の場合、Φ2FBH 相当の欠陥を見つける感度にする、ビレット幅の多重エコーが PRF を 100Hz 以下にしないと消えない。それも面の微妙な形状では時として 50Hz にしても計測に邪魔になる。

◆斜角のシュー内妨害エコー

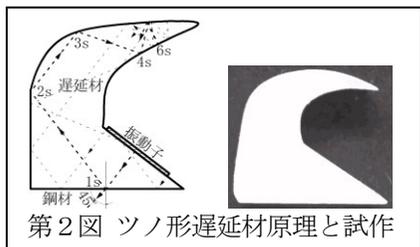
斜角探触子は一般に狭帯域型が多い。狭帯域と広帯域では設計の方法が多少異なる。斜角探触子は厚さ振動子振動子からの音をモード変換して横波にするため、被検査材より音速の遅い楔を使う。一般的にはアクリル、ポリイミドやポリスチレンなどの樹脂を楔型の遅延材(シュー)である。振動子に平行なコーナーや面が出来る為遅延材内の反射エコーが比較的大きく、それを小さくする為超音波非破壊の黎明期から色々な細工がされた。垂直や二振動子型なども似た細工がされる。

- 1) ツノ形の遅延材形状
 - 2) 遅延材自体の減衰率が高い物を使う
 - 3) 寸法は成るべく小さくする
 - 4) 90度コーナーはビーム方向に作らない
 - 5) 反射面に減衰材を配置
 - 6) 振動子端や面と平行な部分を作らない
 - 7) 反射面を傾ける
 - 8) 反射面を凸凹にする
 - 9) 電氣的フィルターを組み込む
- があり、多くは組み合わせている。

◆ツノ形楔の内の妨害エコー除去

探触子内妨害エコー,散乱エコー,タングステン・バッキング,シュー内エコー,コーナー反射,楔の材料,多重反射,遅れエコー,ケースからのノイズエコー,電氣的フィルター,コンポジット振動子のノイズ

大昔はほぼ全ての斜角探触子はツノ状の遅延材を用いていた(第2図)。図の左の様に何度も反射するようにする。反射毎に音の一部がモード



第2図 ツノ形遅延材原理と試作

変換してメインビームは徐々に弱くなる。反射が進むと音は振動子に戻ってくるが、振動子面にはランダムと言える色々な角度、位相や振幅で戻って来て、合計音圧がゼロに近づき、伝播方向もバラバラで、振動子で電圧、即ちエコーをほぼ発生しない。超音波可視化装置などで、ツノの中を観測すると振動子に大きな音戻ってくるのが観測できる。音は戻って来てもエコーとして観測されない。ツノ型の遅延材は誰でも簡単に作れ、且つ実用レベルの良い結果を得る。遅延部が大きくなり、加工も大変なので今はあまり使われない。バッキングなど減衰材を貼る必要もなく、形状加工のみで済むので、特殊な入射角の探触子を自作する際は便利である。現在なら光造形3Dプリンターで作る事も出来る。

前述のツノ状でエコーが小さくなる事に関して、一部の書物に角の先端で波が干渉して音が無くなると記載されているが、エネルギー保存則から一度発生した機械的エネルギーが他のエネルギーに変換しない限り無くならない。熱に成ると書かれている場合もあるが、強い音波を発生させてもツノの先端の温度が特に上がる様な現象は観測されない。音が熱に変わるまでにはm秒や秒単位の時間がかかりμ秒単位の非破壊の時間では音から熱への変換は起きない。

一般に広帯域探触子はタングステンの粉を樹脂で固めたタングステン・ダンパーを使う。このバッキングは色々な経度で音速分散させることにより減衰を実現している。ツノ形クサビも

色々な経路による音速分散と考えられ、タングステン・ダンパーを同じ効果と言える。

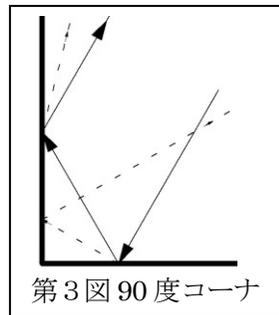
◆楔の材質

昔はツノ状にして振動子に戻ってくる音波により僅かに妨害エコーが観測される場合に、材質を変えた。アクリル(PMMA)は比較的素材自体の減衰が大きく、昔はアクリルが主体であった。1MHz以下だとアクリル内で殆ど減衰しないので、柔らかめのエポキシ系にする。5MHzを超える高い周波数では、楔内で損失が大きく探傷感が悪いので、楔内寸法が小さくない限りポリスチレンの重合体(非破壊用ポリスチレンと呼ぶ、昔高周波コネクタの材料として開発された誘電率が低い材料)が使われる。現在でも多くはこのルールに従って材質を選んでいる。新素材が増えたことから、5MHz付近ではポリイミド、10MHzではPEEKなど、周波数や耐熱など他の物性も考慮して選択肢は多くなった。

なお、樹脂の製造法にキャスティング(流込)法と押出法がある。押出法では多くの場合、音速異方性となるので、使用に注意が必要である。アクリルの場合、押出法の材料では水に浸けていると細かな罅が入りやすい。探触子ではないが、超音波水槽をアクリルで作る際は値段が高いがキャスティング材が良い。

◆コーナー反射

第3図の様に90度のコーナーは何方から音が入っても同じ方向に戻る。最初と2度の反射後の音波の波面の角度も変わらない。探触子内部には90度のコーナーは余り作らない様に設計する。角度によってはモードに変換して違う角度になるので、逆に90度コーナーを上手く使う事もある。



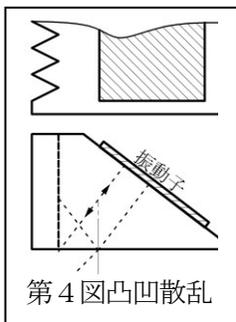
第3図 90度コーナ

探触子内妨害エコー,散乱エコー,タングステン・バッキング,シュー内エコー,コーナー反射,楔の材料,多重反射,遅れエコー,ケースからのノイズエコー,電氣的フィルター,コンポジット振動子のノイズ

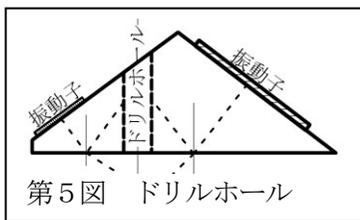
◆三角凸凹にして散乱させる

妨害エコーの発生原因の反射面を三角凸凹にして散乱させる方法は良く用いられる。探触子寸法が大きくなならない様、凸凹のピッチ(第6図のp)は波長の1~2程度にするのが一般的である。凸凹のピッチが波長の1/4より小さいと、その波にとって凸凹の無い平面と変わらない様な反射をするので散乱させる効果が少なくなる。凸凹のピッチは荒い方が良いが、その分探触子寸法が大きくなる。なお、先端でビームが切断されBEDが発生するので、厚さの無い割れ(端部エコー等)同様に比較的強い反射エコーが観測されるので注意が必要である。三角凸凹のみで十分邪魔エコーを消すことは通常できない。

三角の凸凹は山カッターを数枚並べて一度に加工できるため、加工容易なので良く使われる(第4図)。



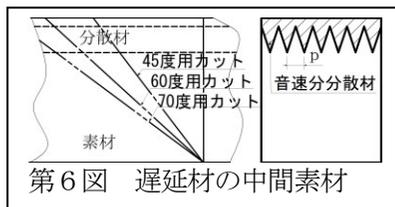
三角凸凹の代わりにドリルホールを用いる方法もある(第5図)。ビームが鋭く切られないので、BEDの発生も少ない。幅の無い割れは容易に検出できるが、ブローホールが検出できないのと同じで、振動子に戻る超音波の波面は振動子と平行ではなくなる。特定の部位から反射が発生する場合やマルチ振動子やケース形状の制約で凸凹の面を作るのが大変な場合によく使われる。



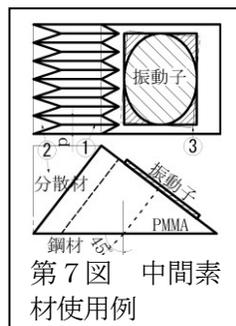
◆量産用楔

量産で探触子を作る場合、反射面に減衰構造を設けた大きな中間素材をあらかじめ作って在庫し、それを必要に応じ適切な角度で切って使う事がある。角棒の面をマルチカッターで第6

図の様に三角の凸凹にして、そこに音速分散材を埋め込む。埋め込み材料の音響インピーダンスは遅延材に近い方が良い。音速分散材は基本波長の2倍以上、出来れば3倍以上の音速分散させると狭帯域から広帯域までカバー出来る。通常の探触子の帯域幅は



30~100%で、中心周波数又は公称周波数の半分以下の周波数の感度は急に低くなる。その為、音速分散による伝播時間の差が基本波の2倍以上にすると急にノイズ・エコーが弱くなる。分散材が適切だと、波長より短いピッチpでも効果がある。

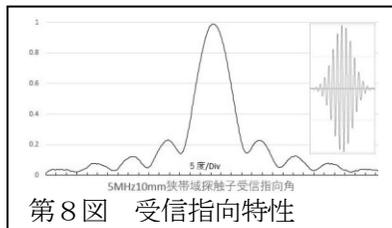


◆面の傾斜

妨害エコーの原因の面を少し傾けると妨害エコーは急に低くなる。第8図に振動子の受信指向特性計算結果と計算に用いた波形を示す。

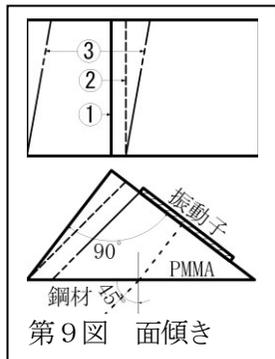
5MHz10mm角の場合だが、ビームの振動子面に対しての入射角が10度傾くと受信振幅が約半分になる。なお波形が広帯域だと指向特性は滑らかになる。

音が反射する場合、反射面角度の2倍の反射角度で反射する。同図から5度傾ければ10度の角度相当に感度が低くなる。受信指向特性の凹谷の低い部分に振動子への入射角を合わせれば容易に1/10以下になる。この面を傾ける方法は



探触子内妨害エコー,散乱エコー,タングステン・バックング,シュー内エコー,コーナー反射,楔の材料,多重反射,遅れエコー,ケースからのノイズエコー,電氣的フィルター,コンポジット振動子のノイズ

国内では良く使われる。第9図の45度斜角例の様に元々①の稜線を②へと傾け90度からずらし、更に③へとずらす。二軸方向に傾いているので、一方向き傾きの二乗の効果がある。国内探触子メーカーは良く使う手である。海外では前述の中間素材を使う方法が多い。



第9図 面傾き

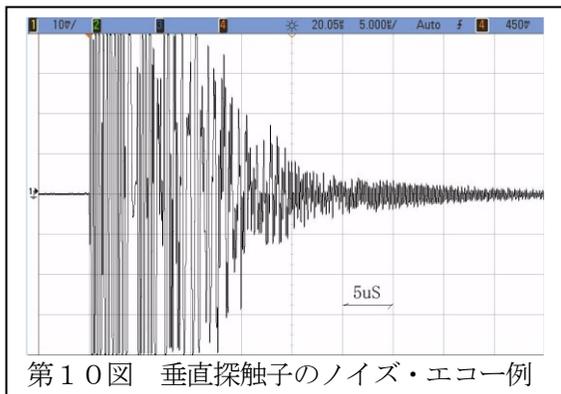
がケース外側にも伝わっていると判る。特に低周波探触子では大きく変化する。この探触子内のノイズが小さな欠陥の検出サイズを決める。良好な探触子ではミクロン・サイズのブローホールも検出可能である。一部の論文や書物ではこのノイズを散乱ノイズと言っている。探触子内部の振動子から前後に同じ慣性量(エネルギー)の音が出ていて、後ろに行く音を成るべく表示しない様に探触子と探傷器が調整されている。第10図のノイズは探触子内部のノイズである。

◆振動子の形

一般に角型振動子より円形の方が妨害エコーは少ない。角型だと、遅延材の稜と平行な部分が出るが、円形では遅延材の稜と平行な部分が無いからだ。第7図点線③の様に角型でも少し傾けて張り付けると妨害エコーは弱くなる。振動子の周囲形状を緩やかな凸凹にしても効果がある。

◆垂直探触子のノイズ・エコー

第10図に市販0.5MHz20Φ広帯域垂直探触子をパルサーレシーバに繋いで観測したエコー

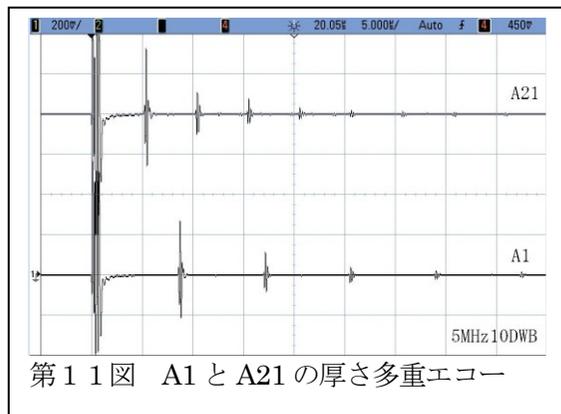


第10図 垂直探触子のノイズ・エコー例

波形を示す。比較的綺麗な減衰カーブであるが、例えば受信特性の帯域が広い場合、特定の部分に高いノイズ・エコーが発生することが多い。接触媒質を塗った手で握ると、減衰カーブがより急峻に減衰するカーブに変化する、超音波音

◆探触子や遅延材の寸法

遅延材の大きさは小さい方が良い。例えば厚さの異なる同じ材質の多重エコーを観測すると、薄い板の方が多重エコーの包絡線が早くベースラインに収束する。減衰の少ないJIS試験片A1とA21で測定すると第11図の様に成る。音が



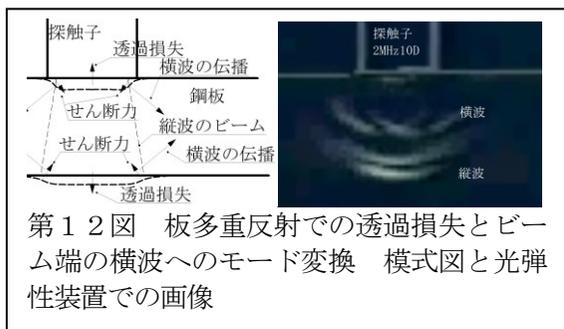
第11図 A1とA21の厚さ多重エコー

板の表裏面で反射する毎に、透過損失を受け、又ビーム端が第12図左の模式図の様にせん断力を生み、モード変換し、振動子で受けにくい横波となる。同図では正の音圧の場合の変位を破線で大きめに描いた。横波は拡散する横波であり、且つ振動子で受けにくいので、メインビームのエコー波形からは一見減衰したと観測される。せん断力は鋼材では概略45度方向が強い。一般に応力に依る割れ先端の方向は表面に垂直でなく45度となるが、それと同じ理由であ

探触子内妨害エコー,散乱エコー,タングステン・バッキング,シュー内エコー,コーナー反射,楔の材料,多重反射,遅れエコー,ケースからのノイズエコー,電氣的フィルター,コンポジット振動子のノイズ

る。その為縦波ビームが境界に入反射する時、ビームの端から 45 度方向に横波が発生する。メインビームの透過損失は音響インピーダンス差から容易に計算できるが、モード変換分の計算は困難である。これは板の内部の話だが、探触子の中の音も、探触子部材が小さければより早く音が外に出たり、早く受信エコー波形として表示されにくい波に変化したりする。「エコーが無い」=「振動子に入射する音波が無い」ではない。エコーとして表示されなければ良い。

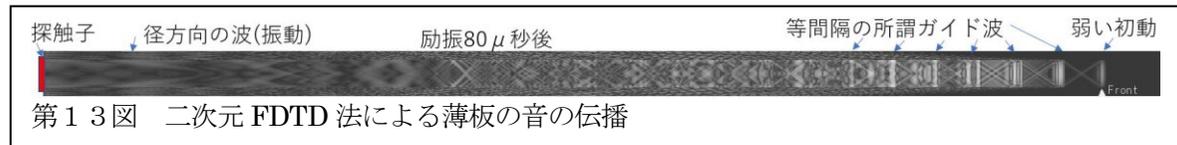
材料自体の減衰知る為、多重エコーによる測定が行われることが有るが、このビーム端のモード変換による減衰の影響が考慮されていない事が多い。大きな振動子の探触子で、広い平面



第 1 2 図 板多重反射での透過損失とビーム端の横波へのモード変換 模式図と光弾性装置での画像

波ビームを発生し、中心だけを少し小さな振動子で受信し、平面波成分のみを測定する様にするなど工夫が必要である。

◆ケース・ノイズ・エコー



第 1 3 図 二次元 FDTD 法による薄板の音の伝播

ケースの壁が厚いと、壁の寸法(径又は高さ)相当の多重エコーが観測される。壁を薄くすると消える事が有る。

長い薄い板の端面に広帯域探触子を接触させ、一探触子法で板の長さを測ろうとすると、端面からの反射エコーは小さい。二探触子法にして、送信側は効率の良い 2~5MHz の探触子を使い、

受信側に低周波探触子を繋ぎ、受信実効帯域幅を特に低域側に広げると容易に端面が観測される。この方法は二層振動子型探触子として実用化されている。

第 1 3 図は 2MHz パルス音が 10mm 厚鋼板の中を伝搬する様子を二次元 FDTD でシミュレーションしたものである。伝播すると縦波の 2MHz の初動は弱くなり、一般に遅れエコーと呼ばれる鋼棒の 1.54D 相当の横波にモード変換した音が、集合し所謂ガイド波を形成する。入力エネルギーの大半は低周波成分となっている。このガイド波の周波数に対して感度が高い低周波探触子で受信すると端面の反射エコーが容易に観測できる。この方法で 50m 程度長さの矢板の長さは容易に計測できる。

2MHz の一探触子法では薄くて長いと 2MHz 成分は伝播に従い弱くなる。探触子ケースはその共振(多重)がエコーに現れない様に薄く設計される。通常壁の厚さは波長の 1/2 以下が理想だ。

溶接部の手探傷の様に朝から晩まで握って使う斜角探触子などでは、指による摩擦が長い間に発生し、振動子などの故障の前にケース壁の厚さが薄くなり、破損に至る。基本的に探触子の壁は薄くするが、探触子の種類によってはケース厚さによるノイズが高いのを許して、厚くしている。一般的規格の試験片の人工欠陥の反射は比較的大きく、薄くする必要はあまりない。しかし、微細欠陥など検出する場合は、考える

必要がある。

自動探傷器などネジで締め付ける探触子では取り外し時に繰り返し応力が加わりケースと中身が剥離する。こういった場合は厚肉としてケース内側を凸凹にする。円筒形のケースの場合は内面ネジ切り加工で代用する。

探触子内妨害エコー,散乱エコー,タングステン・バックキグ,シュー内エコー,コーナー反射,楔の材料,多重反射,遅れエコー,ケースからのノイズエコー,電氣的フィルター,コンポジット振動子のノイズ

鋳物でケースを作る場合は、外面を凸凹にすることが多い。

◆焦点型探触子

特定の深さ位置の感度を良くしたレンズ又は曲面振動子を用いた焦点型探触子は、その焦点の付近以外を検査対象としていない為、探触子内の色々なエコーに余り邪魔されない。例えばバックキグを音が減衰しない様な薄い材料にしてもバックキグ裏面からの反射エコーは非常に小さい。受信開口面が曲面である為、平面反射体からの反射エコーに関しては感度が低いと言える。一方受信開口面が円弧の場合、それと同心円の面からの反射エコーに関しては感度が高い。減多に同心円構造にならないし、そう成っても少し芯をずらすと解決するので、焦点型探触子は探触子内部エコーによる SN 比を改善するのが楽と言えよう。

◆バックキグのエコー

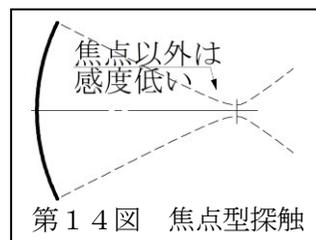
振動子の後ろに張り付けるものをバックキグと呼ぶ。狭帯域の斜角探触子は裏面にコルクなど音響インピーダンスの小さな材料を貼って音を反射させる。バックキグを貼らない方が性能は良いが、長時間探触子を使うと接触媒質や湿気などが内部に浸透し、振動子裏面の電極に到達し、電氣的に特性が変わる。それを避ける為、振動子にコルクなどを貼り、ケース内は樹脂、発泡剤等で充填する。充填剤が振動子に直接接続しない為にもバックキグは必要である。

一方広帯域探触子特に垂直探触子が多いが、波数を短くするためにバックキグを設ける。振動子からは裏表に音が等量であるので、裏に出た音をバックキグで吸収すると、送信エネルギーとしては半分となる。バックキグを貼るとその



第 1 5 図 0.5MHz76Φ広帯域探触子

音吸収分感度が悪くなるが、波数の少ない広帯域型となる。振動子から後ろに行く音をバックキグで出来るだけ反射させない様にする為、音響インピーダンスが振動子に近いバックキグ材料が選ばれる。使われるのはタングステン(W)粉と樹脂を混ぜたもので、調合と圧縮により音響インピーダンスを振動子のそれに近くする。



第 1 4 図 焦点型探触

帯域幅 100%程度の 5MHz 探触子ではこの W バックキグは 10 mm 高さ程度で十分な減衰効果が得られる。概略実用厚さは周波数に反比例し、0.5MHz では 100 mm 厚さのバックキグと成る。欠陥サイズが小さかったり、対称材料内の減衰が大きいと、この厚さでも必ずしも十分ではない。

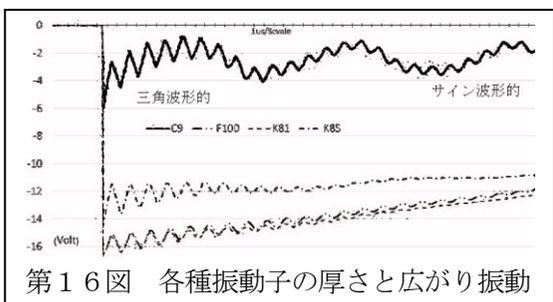
第 1 5 図の写真左は 1980 年代に試作された実用周波数が 0.1MHz~0.5MHz の一探触子法探触子を示す。可変周波数パルサーと組み合わせて使われた。30 cm のコンクリートの厚さを測るだけでもバックキグ厚さ 10 cm で 3.6kg 重量の探触子がギリギリである。50cm のコンクリートが対象だと、30 cm 程度の W バックキグが必要で、試作はされたが、手による操作が困難であった。写真右は 2000 年代のコンクリートを対象にした超広帯域 0.05MHz~0.5MHz 探触子である。バックキグは 5 cm と薄く、バックキグ裏面の多重エコーが観測される。大きな健全部でのエコー波形、または探触子単体のエコー波形を取り込み記憶し、その波形を常に引き算する事により、バックキグ裏面の波形を消す探傷器側の電気回路、ソフトとの組み合わせによって 50 cm 程度のコンクリート版厚測定に使用でき使用されている。送信波や表面エコーも削除できるので、使用波長より近い表面直下の欠陥も検出可能となる。同様の手法は 1980 年代に米国 TI により IC の表面下の欠陥検出に実用化されていた。10MHz の広帯域探触子で、

探触子内妨害エコー,散乱エコー,タングステン・バッキング,シュー内エコー,コーナー反射,楔の材料,多重反射,遅れエコー,ケースからのノイズエコー,電氣的フィルター,コンポジット振動子のノイズ

100MHz 広帯域探触子を超える表面分解能を達成されていた。海外では良く使われている様である。ただし、音波的表面性状の変化が少ない事が前提である。

音のエネルギー、慣性力は、ニュートンの慣性の法則から減衰しない。バッキング材にタングステン(W)粉と樹脂を使った減衰材が良く使われるが、音響インピーダンスの大きく、音速の速い W と樹脂の音響特性差を利用し、音速を下げ、且つ音速分散を大きくしている。W 以外に安価で安全な材料が無いので W 以外に選択肢がない。ヘビー・メタルと言えば W と同義である。劣化ウランも W 同様の性能を出せるが、放射能は無い物の製品のイメージが悪いので使われない。

一探触子法で、0.1MHz と云った低周波の探触子は市販されていない。音速分散を多くして、



第16図 各種振動子の厚さと広がり振動

バッキング裏面からの反射エコーを少なくすることが非常に困難な為である。前述の電氣的又はソフトで処理するしかないが、市場が狭いので、同様の機能は市販探傷器には組み込まれていない。

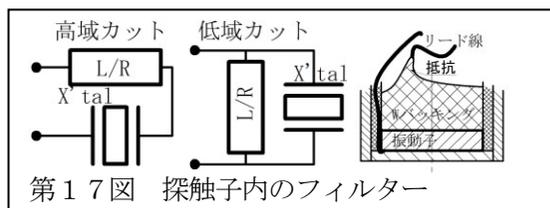
W バックリングなどの減衰特性は温度が低いと悪くなる。極寒では低周波探触子はヒータで温めながら使うなどしている。

W ダンパーの粒子径は 1μ 程度が使われる。粒径が小さい程音速分散が大きくエコーの減衰は激しい。粒径が 1μ 以下だと、粒子自体が凝集しやすく、均一なバッキングが出来ず、多数の不連続部が発生し、エコー減衰特性が逆に悪くなる。

W ダンパーは W 粒子と樹脂を使うが、特定の音響インピーダンスの減衰量の素材を薄い W など金属と薄い樹脂の積層構造で作れる。粒子ほどは減衰量が多くないが、二振動子法探触子の音響セパレータなどに使っている。W ダンパー単独では十分な減衰が得られない場合、W ダンパー材の薄い多層も使われる。

◆電氣的フィルター

探触子に依るが電氣的フィルターが探触子の中に組み込まれ、使用者が目にする事は少ない。カタログにも記載がない事が多く、研究者が探触子を購入する場合は注意が必要である。探触子の中は振動子と配線のみと思っていたら、インダクタンス等思いもよらない部品が入って



第17図 探触子内のフィルター

いて予想外の実験結果をもたらす。インダクタンス又はトランス、或いは抵抗、時に容量が使われる。

圧電素子は固体で多くはポアソン比が 0.1~0.5 で厚さ振動のみをさせる事は出来ない。コンニャクを押して薄くすると広がる様に、厚さ振動させると同時に広がり振動が起きる（一般に横振動と呼んでいる）。0.5MHz 40Φ の材質の異なる材質の振動子を探傷器に繋ぎ、ダンピング抵抗を大きく設定した探傷器接点端子の電圧を測定した結果を第16図に示す。励振電圧単位は実際の約 1/10 であり、負荷として重い PZT 系振動子の実効励振電圧は低い。何れも振動子も 0.5MHz 相当、約 2μ 秒周期の振動子の厚さ振動相当の周波数成分と低周波のウネリが観測される。実際の探触子でも低周波のウネリ相当の径振動があり、そのポアソン現象による厚さ変化の音波が起き、振動子面から厚さ相当の音の他、径相当の音就送・受信される。図の

探触子内妨害エコー,散乱エコー,タングステン・バッキング,シュー内エコー,コーナー反射,楔の材料,多重反射,遅れエコー,ケースからのノイズエコー,電氣的フィルター,コンポジット振動子のノイズ

振動子の場合厚さと径の比は約 10 であり、約 0.05MHz 相当なので、多くの場合探傷器のアンプの帯域外になりエコーとしては観測されない。高い周波数の振動子や厚さと径の比が近い振動子では径振動相当がエコーとして観測され邪魔な事がある。厚さ振動は裏面に配置されたバッキングに吸収されるが、振動子厚さが相対的に厚い場合、径振動は余り吸収されずエコー表示される。例えば 10MHz ϕ 5 の探触子では、振動子の種類にもよるが、径振動は約 1/30 の 0.3MHz である。それもきれいなサインカーブでなく、高い周波数成分が 0.3MHz 相当の周期で発生している。探傷器の帯域内なので、観測される。

これを解決するには、邪魔になる周波数での感度を下げる。一般にはインダクタンス成分を振動子と並列接続する。インダクタンスの代わりに抵抗を使う場合もある(第 17 図)。インダクタンスの場合カットオフ特性は -12dB/OCT、抵抗では -6dB/OCT である。なお、図右の振動子と並列にコンデンサー(容量)を組み込む場合がある。容量を加え、探触子の等価容量を増やして、受信アンプの入力インピーダンスに依る低域カットを弱め、帯域を広げて「超広帯域探触子」として販売されている。容量の並列接続した分感度が落ちる。通常の広帯域探触子を使って、探傷器接診に高耐圧コンデンサーを接続すると簡単に超広帯域探触子での試験が容易にできる。

第 16 図の下の方の感度の悪い異方性のネオニオブ系振動子などの低周波のウネリは相対的に小さく、高 SN 探触子を作る場合は、感度を犠牲にして、これら相対的に径振動の小さな振動子が使われる。

振動子の径と厚さ寸法が近い振動子は、両方の共振周波数が近く、インダクタンスなどを使ったフィルターで分離する事ができない。その為、例えば 5MHz(厚さ 0.3 mm 程度)で 0.5 mm 径の振動子を使った探触子は波形が綺麗でなく、一般に市販されていない。5MHz で 0.5 mm 径の振動子の探触子が欲しい場合は、感度が悪くなる

が例えば 50MHz と薄い振動子を使って、帯域を低域側に伸ばして使用する。振動子の容量と付加するインダクターとで低周波共振させて帯域は狭いが 5MHz が中心周波数のものも作れる。

スパイクやスクエア励振だと厚さ振動による波は矩形波の音圧波形となる。第 16 図の受信エコーは、連載の初期に述べた様に、インピーダンスの高いアンプを接続して場合、矩形音圧波入力で三角形の電圧を発生する。励振直後は三角波(音圧は矩形波)で、徐々にサイン波(音圧もサイン波)の様に観測されている。図から振動子自体も減衰材であることが判る。その一つの指標が Q 値である。一般に音波に含まれる高調波は材料中などで、基本波より速やかに減衰するが、振動子素材や目的によっては高調波成分が邪魔になる。その場合は探触子の中に抵抗を直列に入れる事もある。Wダンパーは電氣的には一種の抵抗で、抵抗を組み込まず、Wバッキングを抵抗として利用する。後面リード線は取り付け部付近の形を削って良いエコーに成るように調整する。

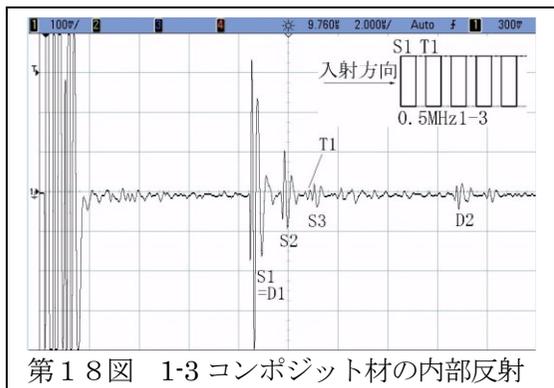
なお、曲率半径の小さな曲面振動子では径振動があっても、裏面のバッキングに径振動が伝わり直ぐに音は吸収されるのでインダクタンスを組み込むことは少ない。

◆振動子内の残留エコー・ノイズ

前項までの各種対策をして最後に残るのが、振動子内の残留エコー・ノイズである。Wダンパーの所で粒子径が小さいと音速分散が大きくなりエコーの減衰が大きく観測されると書いたが、振動子の中も同じである。振動子も一種の減衰材である。減衰が大きいと、Q 値が小さくなる。一部振動子メーカーは、(仮焼成)粒子径を公称周波数に反比例させ Q 値が一定に成るようにしている。この場合、同じカタログ材質でも周波数で材質が異なる事になる。カタログ値は 20 ϕ 2 mm 厚さ円板のデータを用いる事が多い。

探触子内妨害エコー,散乱エコー,タングステン・バックキング,シュー内エコー,コーナー反射,楔の材料,多重反射,遅れエコー,ケースからのノイズエコー,電氣的フィルター,コンポジット振動子のノイズ

W ダンパーの特性が温度で変わるので、Q 値が高いと温度で波形が激しく変化する。通常広帯域探触子の場合 Q 値が 10~30 程度の場合、波形の変化が少なく、また多少の材質の違いによる特性変化もなく、使いやすい。1-3 や 2-2 コ

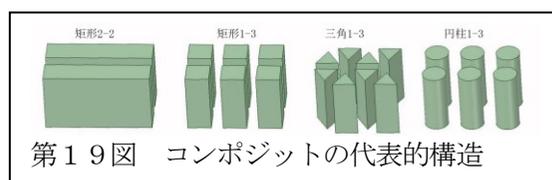


ンポジット振動子も似た Q 値で設計される。特注の振動子の場合、必ずしも Q 値優先ではなく、電気と音響のインピーダンスとの兼ね合いも考慮される。

一定の Q 値にする為に、低い周波数の振動子ほど粒径が大きい。即ちエコーの減衰が少ない。低周波の方が減衰量を必要とするのに減衰が少なくなり、振動子内の残留ノイズが増える。送信波や大きな表面波の直後の小さな欠陥を観測したい場合邪魔になる。

一番よく気が付くのは低周波の角柱 1-3 コンポジット広帯域探触子を作る場合、単一セラミック素材の振動子より SN 比が悪い。第 18 図に遅延型垂直探触子で 0.5MHz 1-3 コンポジット振動子の側面から 20MHz 遅延付き探触子で計測した波形を示す。遅延材の前面 D1 から等間隔で最初の柱の反射が観測され、次の柱の表面も僅かに観測される。技と樹脂を大きな音響インピーダンスのものにするともっと良く観測される。柱間に多重反射があり、それが残留ノイズとなり SN 比を下げる。通常 1-3 コンポジット系はダイシング・ソーで製造するので、四角の断面形状である。三角や菱形柱等でも SN を調べたが、少ししか良くならない。ダイシング・ソーでは製造困難であるが円形にすると比

較的よくなる。平行な面が無くなる為である。Spring8 大型放射光装置を用いて作った微細深丸穴がアレイ状に並ぶ金属型を基に、樹脂の雌型を作り、セラミック・スラリーを流し込んで、形成し、プラズマで樹脂を除去した後焼成する方法で、SN と感度の両方の良い丸柱 1-3 コンポジット探触子が作られた。1-3 コンポジットをダイシングで作る場合アスペクト比（振動子素子高さとの比）を 10 にするには、10MHz が限界で、それ以上は 1-3 構造に依る音響効果



が下がる。放射光を使ったこの方法ではより細かな 1-3 の製作も可能で、アスペクト比 10 以上で 50MHz 程度まで作られた。通常の 1-3 構造振動子より SN 比は良い。今は新規販売されていない。潜水艦用には押し出法で作った細い丸棒（ファイバー）PZT 振動子を使った丸柱 1-3 コンポジットは作られている。低周波の製造はできるが、非破壊で使える MHz 帯の振動子は今のところ製造困難である。約 1μ 径のセラミック振動子粒子と樹脂を混練した 0-3 構造のコンポジットは、丸柱型より SN 比が頗る良い。前図の何れも柱の列が平行だが、0-3 構造ではランダムになる為と考えられる。微細欠陥検出には使われるが、製造メーカーに限られる。

単一振動子でも Q 値を 20 程度に下げる為、粒径が大きくなり、残留ノイズが気になる事もある。粒子径の指定が振動子注文時にできないので、振動子材質より振動子メーカーを選ぶことになる。

◆あとがき

今回は探触子の内部雑音に関して述べた。市販探触子は市場の大きい部分をカバーするように経験的に作られており、何か新しい事をしよ

探触子内妨害エコー,散乱エコー,タングステン・バックキグ,シュー内エコー,コーナー反射,楔の材料,多重反射,遅れエコー,ケースからのノイズエコー,電氣的フィルター,コンポジット振動子のノイズ

うとすると、市販探触子では制限が多く、出来ない事が多い。

◆今回知った事

- (1) 探触子内のノイズを小さくするには、振動子に音が入射しても、エコーとして表示させない。
- (2) 受信振動子へ伝わる合計音圧をゼロにする。
- (3) 入射音波波面と振動子面間の角度を直角にしない。
- (4) 音をより低周波の音に変換する。
- (5) 電氣的ノイズはランダムなら平均化処理すれば $\sqrt{\text{平均化数}}$ と小さくなる。
- (6) 探触子ケーブル長さは短い方が良い。
- (7) 大きな信号の直後はアンプの追い込み現象で感度が下がる事が多いので留意する。
- (8) 減衰の少ない大きな材料例えば鍛造角ビレットではPRFを100Hz以下にしないとゴースト・エコーがノイズとなる。
- (9) 基礎試験では、送信波の前の波形で、前サイクルの影響を確認する必要がある。
- (10) 斜角用のツノ形の良好な楔は誰でも容易に作れる。
- (11) 「エコーが無い」=「振動子に入射する音波が無い」ではない。
- (12) 1/4 波長程度以下のピッチの凸凹での反射は、平面と変わらない。
- (13) 凸凹の代わりにドリルホールも音を弱く受信する効果ある。
- (14) 楔の材質は探触子の周波数に応じ適度な減衰材が良い。
- (15) 探触子の中では90度反射面は避ける。
- (16) 反射面や振動子の角度を少し傾けると反射エコーが急に弱くなる。
- (17) 探触子のケースなど部材は強度不足にならない範囲で薄くする。
- (18) 振動子の裏面側への音は、良好なバックキグにより消すか、電氣的にソ

フト又はハードで消す。表面直下波長以下の深さの欠陥の検出もされている。

- (19) 広帯域探触子のバックキグ材は温度特性が敏感なので、特に低温使用時に注意する。
- (20) 振動子の広がり振動がエコーに現れ邪魔な場合はインダクタンスや抵抗で減衰させる。
- (21) 色々な対策をして残るのは振動子内残留エコー・ノイズである。
- (22) SN比の高い探触子には粒界の細かな振動子が有利である。
- (23) コンポジットの場合、角柱より丸柱1-3、更には0-3構造のSN比が良い。

<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)

Y.Udagawa and A.Yamada, "Simulation and Verification Experiment of Radiation Sound Pressure Waveform from Finite Aperture Piezoelectric Transducer", The 34th Symp. Ultrason. Elect. (2013).

USE2013 Analysis and Observation of Sound Wave Field from Finite Aperture Piezoelectric Transducer - Fact-finding of Misfit between Conventional Analysis and Experiment Observation -