解 説

複合材料の非破壊検査—4. 超音波

葭田 雄二郎*, 柳 原 俊 夫**

1. 超音波とその分類

音の中でも人間の耳では聞くことのできない周波数の高い音, つまり可聴音波の周波数 20 kHz よりも高い周波数の音波を超音波と呼んでいる。超音波の発信とか受信, および超音波の特性については別の文献を参考としていただくこととして, ここでは複合材料の非破壊検査法として使用される各種の超音波検査法について, それぞれの特徴を重点に説明することにする。

固体を伝播する超音波にはその波動から, 縦波, 横波, 表面波が存在するが, 複合材料の非破壊検査に用いられている超音波はほとんどが縦波である。そして検査方法としては透過法, 反射法, 共振法に分類される。

超音波による内部欠陥の検出は, ボイドとかデラミネーション等の欠陥境界部で超音波が反射または散乱する性質を応用したもので, 被検査物に送信した音波が欠陥によって変化したときの情報を把んで内部品質を確認する方法である。したがって, 検査に用いる音波および被検査物への送信の仕方は想定される欠陥からの情報に合わせて選ばなければならない。そして製品の検査に対しては, 被検査物の形状, 構造, 構成材料に合わせて適切な検査方法が採用されることになる。

2. 透 過 法

透過法はその使用する音波によって連続波法とパルス法に分類される。複合材料の検査法としてはこのうちの連続波を使用した透過法がほとんどの製品検査に用いられている。

連続波を使用する超音波検査には, その探触子の使い方によって, ①水浸法, ②ウォータージェット法, ③接触法, がある。

水浸法は被検査物と探触子を水槽の中に沈め, 被検査物を送信子と受信子の間に挟んだ形で探触子を走査して検査を行なう (図1)。

ウォータージェット法は送信子および受信子の間を特

殊なスカーターを介して水柱で結び, この間に被検査物を置いて探触子または被検査物を移動させて検査を行なう (図2)。ウォータージェット法の場合は水槽を使わないために大きい検査物に対しても無理なく検査に適用することができる。

接触法 (図3) は送信子と受信子を被検査物に直接に接触させて検査する方法で, この場合は探触子と被検査物との間に超音波の透過を安定させるために, 軽マシンオイルとかグリセリン水溶液のような低粘度のカプランド (接触媒体) の皮膜を必要とする。また, 接触法はほとんどの場合が手作業で送信子と受信子の位置合せが行なわれるために, わずかな探触子のずれが検査不良という結果に結びつく。したがって装置の取扱いが重要で, 通常の製品検査においては他の検査法の補足として用いられる。

2.1 積層構造部の検査

透過法による超音波信号は図4のごとく得られる。この場合, Cスコープと称して記録紙上に探触子の走査位置での欠陥の有無を表示することができる。したがって, 欠陥の深さ方向の位置確認はできないが, 平面的な欠陥の位置とその大きさについては明確に記録することができ, 積層構造物のように均質な材料内に存在するボイドやデラミネーション等の欠陥検出には非常に有効である。たとえば厚さ 13 mm の CFRP 複合材の中に挿入した 5~20 mm² の人工欠陥を透過法によって検査した結果を図5に示す。記録された欠陥の表示は適正な条件で検査すれば 5 mm² の欠陥も精度よく検出できることを示している。

しかしCスキャン法では, 材料表面または内部の材料特性の差異によって超音波が減衰した場合, 感度レベルを高く設定するとこれらを欠陥として検出してしまうことになる。したがって透過法によって検査を行なう場合には, 被検査物の材料構成とか形状によって適切な検査方法を確立することが重要であるとともに, 材料表面にあるレジンスターペーション等の表面欠陥をできるだけなくすることが正しい検査を行なうために必要なことである。

透過法における周波数の選択は図6に示されるよう

* Yujiro YOSHIDA, ** Toshio SAKAKIBARA: 富士重工業㈱航空機技術本部 (320 宇都宮市陽南 1-1-11)

図1 水浸法

図2 ウォータージェット法

図3 接触法

に、同じ板厚に対しても音の周波数によって減衰度が違って来る。つまり、周波数の低いほうが減衰が少なくなるために厚板の積層構造物の検査に対してはできるだけ低い周波数が適している。しかしながら図7に示されるように、内部欠陥としてのボイドを検出するためには低

図4 透過法による超音波信号

図5 厚さ 13mm の CFRP 積層板検査結果 (透過)

図6 積層板の厚さと減衰³⁾ 図7 音の透過に対するボイドの影響⁴⁾

い周波数の音波では検出能力が劣ることになり、このために小さい内部欠陥を検出することが要求される場合の検査方法としては高い周波数の音波を使わなければならない。

したがって使用する超音波の周波数は被検査物の厚さと要求される品質基準に合わせて適切な選択が行なわれる。一般に用いられている周波数は、積層構造物に対しては 2.25~5.0 MHz の範囲が多く使用されている。

2.2 ハニカム構造パネル

透過法による超音波探傷法はハニカムコアを有する構造の複合材パネルに対しても有効に使用されている。透過法による検査は、音がスキンからハニカムコアのセルを伝播して透過する。この場合の主な検出欠陥はスキン内のデラミネーションおよび大きなボイド、そしてスキンとコアの接着不良である。

ハニカム構造パネルを透過法の超音波で検査する場合は、均質な積層構造物の検査と違って超音波の減衰はさらに大きくなる。したがって検査には低い周波数が用いられ、超音波の発信出力も積層板を検査するよりも大きくしなければハニカム構造の場合は音波が透過せず、十分な検査が行えないという問題に直面する。

最近のハニカム構造パネルの製法はスキンのキュアとスキンとコアの接着を同時に行なうコキュア法が採用されるようになってきたため、強度的に重要なスキンの品質確認法としての超音波透過法は、その適用範囲がますます多くなってきているのが現状である。

3. 反 射 法

反射性による超音波検査（図 8，9）は金属材料においてすでに十分確立され、素材および加工品の内部品質の確認検査用として広く用いられている。しかしながら、金属と違って異質な材料で構成される複合材料の検査に対しては実際の応用範囲がまだ少ないといえる。

反射法の原理は、一つの探触子から送信した超音波のパルス（衝撃波）が被検査物の中を透過、反射してくる間に得た材料内の状況をパルスエコーの強さと伝播時間との関係としてブラウン管画面に表示し、欠陥の有無、位置およびその性質を判断するものである。使用する周波数は、樹脂の場合は音波の減衰量が大きくなるために金属に比べて低い周波数が用いられる。しかし、品質要求の面から小さい欠陥を検出確認するためには、欠陥の検出可能サイズが波長の約 $1/2$ ということを考えると周波数は高く採る必要がある。

また、反射法を用いる場合には表面に近い所に欠陥を

図 8 反 射 法

図 9 反射法による超音波信号

図 10 反射板法による超音波信号

検出できない不感帯が存在する。この不感帯は周波数が低いほど、つまり波長が大きいほどその深さが大きくなる。したがって反射法が対象とする主欠陥のデラミネーションについても薄い積層構造の材料に対しては欠陥の検出が非常に難しくなる。このような問題を解決する方法としては反射板法（図 10）という方法が用いられる。

反射板法は被検査物の後方にアルミニウム板またはガラス板等の音を反射させる板を置き、被検査物を透過してきたパルス波がここで反射して再び被検査物を透過し探触子に戻ったときのパルスエコーから、内部にある欠陥の有無について情報を得る方法である。反射板法による超音波検査では、送信したパルス波が被検査物を 2 回通過することになるために欠陥による減衰量は透過法に比べて 2 倍となる。したがって欠陥による音波の反射または散乱する量が大きくなり、小さい欠陥でも検出することが可能である。

反射板法は、その反射板からのパルスエコーを把むこ

とによってCスキャン方式で記録紙上に欠陥位置とサイズを表示することができる。しかしながら、この検査法は探触子と反射板との位置関係が非常に重要であることが欠点でもある。つまり送信パルス波は常に反射板に垂直に入射するようにセットされていなければならない。入射が不良となった場合は反射する前後の音波の通る道が異なることになり、正しい反射エコーが受信できずに検出能力がかえって劣る結果となる。

最近の複合材料の構造物は曲面をもった構造が多くなってきたこと、および一体成形加工技術が非常に進歩して被検査部品の形状が複雑となってきたことから、この反射板法の適用が難しくなっている。ただし、他の検査法では検査ができない構造に対しては、手段を選ぶことによって有効な検査が行なえるため、このような面から新しい活用が期待されるものでもある。

4. 共 振 法

共振法は超音波の中でも低い周波数の音響を被検査物に与え、これに対する被検査物からの応答を利用する方法である。

複合材料の検査に用いられる超音波を利用した共振法は、フォッカーボンドテスター (図 11) とかソンディケータ (図 12) 等の検査装置がある。これらの装置は金属の接着構造部を非破壊検査するために開発されたものであるが、樹脂系の複合材料の内部欠陥の検出に対しても十分に適用できる検査法である。

フォッカーボンドテスターの応用は、欠陥内容がスキンとコアの接着不良または表面層に近いデラミネーションであれば良く判別ができる。とくに透過法または反射法の超音波検査では十分な解決ができなかった欠陥の深さ方向の位置に関する情報を把むこともでき、複合材料の補修を行なうための判断にも使用されている⁵⁾。

また、ソンディケータは使用周波数が 25~50 kHz と非常に低いため、被検査物と探触子の間にカプラントを設ける必要がなく、被検査物の表面を自由に走査させて欠陥の検出が行なえることが特徴である。図 13 はハニカム構造パネルのスキンとコアの間に作った人工欠陥をソンディケータで検出した結果である。この試験の結果から 10 mm² 以上の接着不良部の検出が十分に可能であることがわかる。

したがって共振法による検査は、積層構造物では共振を起こすようなきわめて表面に近い所の大きなデラミネーションの検出に、そしてハニカム構造パネルではスキンとコアの接着部の剥れを検出するのに適しており、散

図 11 フォッカーボンドテスター

図 12 ソンディケータ

図 13 ボイドを検出できるソンディケータの探触子位置 (単位: mm)

供試体: CFRP ハニカム パネル, 人工欠陥: スキン/コア部剥れ

在するボロシティとか積層構造物の内部にあるボイド等の検出は不可能である。共振法の実際の応用は超音波透過法の補助的検査方法として、または他の検査方法では不可能な部位の検査方法として用いられている。

5. 検査結果の判定

透過法による検査は使用する超音波によって欠陥が検出できる感度レベルの設定をまず行なう。この場合の欠陥とは被検査部品に許容されない欠陥であり、すべてのポロシティ、ボイド等の内部欠陥を指すものではない。感度レベルを高く設定すれば許容できる擬似欠陥まで検出することになり、正しい検査の判定ができないからである。したがって超音波を用いて非破壊検査を行なう場合は、許容できない欠陥を正しく検出できる検査方法、検査条件を事前に確立し、その確立された方法によって被検査物を検査、判定する手順が採られる。

検査方法および検査条件の確立は、被検査物と同じ材料構成および構造を有する人工欠陥入りの標準供試体を用いて行なう。人工欠陥の作り方は空洞を設けたり、テフロンフィルムを挿入したりする方法が採られるが、簡便な方法としては超音波を透過しにくい材料を表面に貼りつける方法も行なわれている。厳密には、想定される自然欠陥と同程度の減衰を生じるような欠陥の作り方が正しい検査を行なうために必要である。このような標準供試体を作製して検査の判定に使用する方法は反射法でも共振法の場合でも同じで、より正しい検査を行なうためには常に標準供試体と比較しながら検査を行なうことが大切なことである。

超音波を用いた非破壊検査は、これまで述べたように

被検査物の中にいろいろな方法で音波を送信し、その音波が込んだ内部の情報を解析して検査する方法である。最近では情報の処理方法が発達し、超音波が物体を通して得た情報についてもいろいろな処理が行なわれるようになっており、検査結果も2次元像、3次元像、あるいは濃淡画像処理が行なわれて検査能力の向上とともに検査結果の判定に対する精度も向上してきている⁶⁾。

複合材料を主要な構造物に適用するための課題として非破壊検査による品質保証法の確立がある。したがってこのような新しい情報処理の機能を組み込んだ超音波検査法が複合材料の非破壊検査を確実に行なう手段として、今後ますます発展し品質保証法の一分野を確立していくものと思われる。

参 考 文 献

- 1) 日本非破壊検査協会編：非破壊検査便覧，日刊工業新聞社（1967）。
- 2) 金原 勲：プラスチック，**13**，5（1972），107-112。
- 3) D. Hogemair：SAE 740811。
- 4) D.E.W. Stone：AGARD Conf. Progr., FRA（1978），p. 234。
- 5) R.M. Collins：Mater. Eval., **39**，November（1981），1126-1129。
- 6) 神田喜美雄：非破壊検査，**29**，10（1980），699-704。