

講演3：株式会社ジーネス システム開発部課長 大久保 佳洋氏  
「非接触空中超音波探傷事例」



大学の先生方と違い、こうした講演の機会も少なく、お聞き苦しい点もあると思いますが、よろしくお願いします。

本日は「非接触空中超音波探傷事例」として、空中超音波の技術、探傷事例についてお話します。まず、「会社紹介」の後、「概要」、「超音波探傷」、「空中超音波」について、その後に「探傷事例」、最後に「まとめと今後の課題や展望」についてご紹介いたします。

(株)ジーネスは、General Nondestructive Evaluation System の頭文字をとり、意味としては「非破壊評価システム全般」の意味を含めた会社になります。場所は、けいはんなの学研都市である、京都府の精華町に所在しています。1999年7月に設立され、まだ20年も経過していない、若い会社です。主な事業は、超音波を用いた検査装置の開発、製造、販売、コンサルティング、機器のメンテナンス、アフターサービス、弊社の非破壊検査装置のデモ機を使った非破壊検査の受託試験を行っております。【スライド1】

弊社の非破壊検査システムは、紹介にもありましたが、航空・宇宙、鉄道、自動車、素材、建材分野など国内外で豊富な納入実績を有しております。実際の納入先としては、航空・宇宙、鉄道、自動車、素材として、航空・宇宙ではJAXA様をはじめ大学様にも納入していますし、鉄道ではJR様関係、自動車では記載のような企業に、素材はセラミックスなり、金属などの材料を扱われている企業様に納入させていただいています。【スライド3】

超音波探傷検査についてご紹介いたします。先ほどの大学の先生方のお話しにもありましたが、周波数20Hz以上の音波を「超音波」と呼びます。音を使った検査としては、「ジェットコースター」の打音検査や「トンネル」の打音検査、ソナーの魚群探知機、腹部や胎児を見る医療用検査の「エコー検査」で使われており、音波での検査となります。今回お話ししますのは、「超音波」を用いて検査物を破壊せずに内部の状況、欠陥やボイド等を確認する非破壊検査方法です。【スライド4】

超音波の主な伝達方法としては、「直接接触法」と「水浸法」と「空中伝搬法」があります。

「直接接触法」の意味としては、そのままになりますが、探触子を試験体にくっつけて見る方法です。そのために、水や油をまたはグリセリンを、超音波を伝搬させる媒体として使用します。メリットとしては少量の接触媒質で実施可能ですが、デメリットは直接接触しますので、表面の粗さの影響をまともに受けてしまう点です。ザラザラものや表面が滑らかではない物は探傷しにくくなります。また水や油などの媒質を嫌う材料には使用できません。基本は手動での操作になりますので、操作では操作者の個人差が生じます。

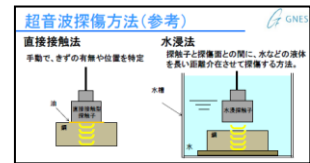
「水浸法」は、探傷方法としては同じですが、安定したスキャンニングができるのがメリットです。安定したスキャンニングをするために、水に浸す状態になりますので、水槽や水回り設備が必要になります。このための設備投資がデメリットになります。

今回お話しします「非接触空中伝搬法」は、空気を媒体として超音波を試験体に伝搬させる方法です。メリットとしては、前の2つの方法に比べると、水や油、グリセリンが必要なく、空気を媒体として実施できますので、非接触で検査が行えるため、液体媒質の使用が不可のものに対応できます。

ただ、デメリットとしては、液体媒質を使用する方法と比較すると、大きなエネルギーが必要となります。また、ここが問題になるかもしれませんが、他の方法に比べると、検出できる欠陥のサイズが大きく、直接接触法は数百ミクロン、水浸法は数十ミクロンの検出サイズに対して、空中伝搬法では数ミリということで、直接法の10倍以上、水浸法の100倍以上という差が問題になるかもしれません。

しかし、水や油が使えない素材は多くありますので、そこに様々なニーズがあります。【スライド5、6】

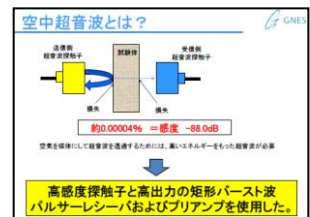
超音波探傷方法			
超音波の伝達方法：直接接触法、水浸法、非接触空中伝搬法			
伝達方法	直接接触法	水浸法	非接触空中伝搬法
探傷方法	水や油またはグリセリン等を確保して検査物を試験体に接触させる。	検査物を液体中に浸漬させる。	空気中を媒体として超音波を試験体に伝搬させる。
利点	少量の接触媒質で探傷ができる。	安定したスキャンニングができる。	探傷物が検査が行えるため、液体媒質の使用が不可のものに対応できる。
欠点	高周波の影響を受けやすいなどの検査対象材料に限りがない。	水槽や水回り設備が必要。	液体媒質を使用する方法に比べて、大きなエネルギーが必要で、検出サイズが大きい。
検出欠陥サイズ	数μm	数μm	数mm



「非接触空中伝搬法」を、少々長いので、これからの説明では「空中超音波」と言わせていただきます。

空気中を伝搬した超音波が、試験体に到達するには、空気と試験体の音響特性が重要になります。そのパラメータが、音響インピーダンスという、「密度」と「音速」の積に大きくかかってきます。試料では空気から鋼材に入る時の透過率をあらわした数式を記載しています。また、探触子から受信側へ到達する超音波をあらわした数式も記載しています。

大学の先生のご講演にもありましたが、固い鋼材の表面で反射される超音波は99.998%ですので、透過するのは0.002%程度しかないというところですね。空気の音速と密度の値、そして鋼材の値はご覧の通りですが、音速が20倍弱異なるものの音を取るの、基本的に難しいとお考えいただければと思います。

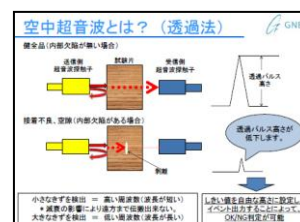


さて、発信部から空気の媒質を通過し、鋼材に到達・透過した超音波が、全体の0.002%となることは先ほど説明しました。この超音波が、さらに空気を通り受信側に到達しますので、0.002%の2乗である0.0004%と、ほとんどと透過していないとお考えいただければと思います。空気を媒体として、超音波を透過するためには、高いエネルギーを持った超音波が必要になります。これが空中超音波の難しいところです。【スライド7】

今回弊社では、色々と組み合わせを検討して、良い組み合わせを考え、高感度の探触子と高出力の矩形パルス波パルサーレーザーおよびプリアンプを組み合わせで使用しています。【スライド8】

先ほども超音波に触れましたが、人が聞こえる可聴音は、20Hzから20kHzあたりになります。探傷に使用する周波数は、0.1MHzから100MHzあたりだと思いますが、空中超音波では、超音波の中でも、20kHzから数百kHzの周波数帯を使います。この音の範囲は、コウモリやイルカが獲物を感知したりするときに使っている、自然界にもある音ではありません。人間の耳には聞こえませんが、自然界にもある、取り立てて危険というものではないと思っていただければと思います。超音波の周波数に関しては、周波数が高いほど透過力は弱くなります。一方で分解能は周波数が高ければ、高くなり、周波数が低くなれば、分解能も低下します。このトレード・オフの関係があり、空中超音波も同様です。【スライド9】

空中超音波の説明が、先ほどの先生方の説明と若干異なるかもしれませんが、「透過法」が主に使われています。図では、健全品と不良品とありますが、音が出たところから受けます。不良部分については、ごく一部の音波だけを受信します。受信の値である「透過パルスの高さ」として絵で描いていますが、こうしたパラメータであらわされます。この信号は、S/Nが高い信号ですが、この値が下がると何か音波を遮る遮蔽物があると考えられます。図では剥離と書いていますが、内部で接着不良などがあると、音は通らずに透過パルスが出たものでは、ほぼ出ないという状況になります。この欠陥部分を見つけるために、あらかじめしきい値を設定し、イベントを出力することで、OK/NGの判定が可能となります。【スライド10】



空中超音波の仕組みをわかっていただけたと思いますが、どのような素材、検査対象となるのかを示したのが、この表になります。

水浸法と空中超音波での比較にし、使用する可能性のある場所ごとに整理しています。ボイドや介在物に関しては、空間ではないので、主に水浸法を使います。空中超音波を使うのは、層間剥離などの空間を有しているものを検査することができます。また CFRP 大型構造物についても丸印をつけていますが、風力ブレードの亀裂などの傷が見えたりします。

今回はこの中でも、赤で囲んでいますアルミハニカム材、リチウムイオン電池、木材、耐火材を、探傷例としてご紹介したいと思います。余談ですが、表中に「特許取得済」と記載していますが、弊社で CFRP のトランパースクラックという積層間に最初に発生する疲労損傷で、断面方向に発生するクラックで、その探傷方法について特許を取得しています。詳しくは Web に掲載していますので、ご覧ください。【スライド11】

探傷の事例1として、アルミハニカムについてご紹介いたします。

ハニカム(honeycomb)とは、蜂の巣のように六角形を隙間なく敷き詰めることで、「最も少ない材料」で「最も丈夫な構造」を実現できるため、力学の観点から理想的で、このような構造を「ハニカム構造」と言います。アルミハニカムは、アルミ箔を敷き詰めて、ハニカム構造に成形した「アルミハニカムコア」を、両側から面板でサンドイッチし、接着剤を用いて圧着することでパネル化したものです。体積の約9割が空気であるため超軽量です。一方、力学の観点から理想的な「ハニカム構造」によって高強度を保てます。

ここでは六角形の絵を示していますが、広義では立体的な図形を並べたものであればハニカムパネルと言っているようです。最初は航空機用の構造材料として開発され、その軽量・高剛性から、一般産業用途でも幅広く用いられています。【スライド12】

なぜこれを空中超音波で探傷するのかと言いますと、ハニカムコアに水が侵入してしまうと簡易的な乾燥では水は出ていきません。ハニカムコアと面材との接着剤は熱可塑性であることが多く、熱を加えると接着剤に悪影響を与える恐れがあります。

特に、図ではロケットを書いています。航空・宇宙材料に使用されていますので、水が残ったままでは、打ち上げ後、水が残っていると、上空で水が凍って固体化し、部品に損傷を与えるという恐れがあります。このハニカムパネルには、両方に接着剤が付いているのですが、接着が不良であれば強度が保てませんので、今回は接着不良を検出可能かどうか確認しました。【スライド13】

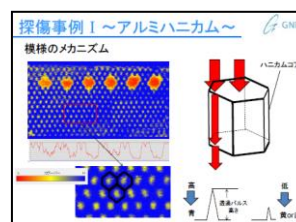
図は、弊社でデモした機材です。

送信側超音波探触子と受信側超音波探触子と上下に挟んでアルミハニカムパネルをその間に入れて探傷しています。

スキャナーとは、電動サーボモーターを使用して超音波探触子の位置を機械的制御し、被検材の各ポイントでの超音波受信信号をプロットしてカラーマッピングが出来ます。【スライド14】

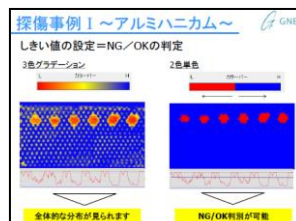
試験用の欠陥として、どのようなものを作ったかと言いますと、ハニカムコアに段差をつけまして、上から面材をつけても部分的に接着しないように模擬した人工の「欠陥」を作っています。それが、図の丸印を計測して見えています。先ほどスキャナーの話をしました、図の右方向から左に動いてスキャンし、高い所は透過パルス高さがゼロに近い値を示し、青い部分は透過パルスが全く通っていない欠陥があるところとなります。透過パルスの高さのグラフについては、欠陥部分はゼロに近い値で推移することになります。これにより欠陥を検出出来ているということになります。【スライド15】

結果の表示の様子は、ハニカムコアの周辺は超音波が通りますが、内側は空気ですので通りません。青い部分になります。しかし、コアの壁に沿って音が回り込んでしまうので完全には青にならず、ある程度の計測となり黄色くなり、結果として赤と黄色と青になります。これで、ハニカムコアと空間が規則通り並んでいる構造であることが確認できます。【スライド16】



この模様の中でも、欠陥の判別をするために、3色のグラデーションでは製造現場では評価する際に黄色や赤の評価をすることは効率的ではないので、2色の単色表示として、判別者が分かりやすく表示するように、しきい値、この図では50%としています。赤と青の表示をするようにし、赤は欠陥とわかるようにしています。この図では50%としてしきい値を設定していますが、実際にはデータの蓄積からしきい値を決める必要があります。

【スライド17】



次に、探傷の事例の2として、木材を探傷した結果になります。

なぜ空中超音波で探傷するのかと言いますと、木材が水を含むと乾燥時に割れを発生させることがあります。また、木材の腐食の原因となります。このため、水はできるだけつけたくないということになります。今回は、ひのき無垢材を105角の600ミリの角材を使用しました。また、空中超音波だけではなく、X線CTの検査も行いそのデータとの比較をお示しします。【スライド18】

空中超音波に関しては先ほどと同じですが、間に木材を探触子で挟み、スキャンをしました。【スライド19】

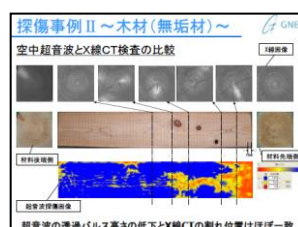
X線CT検査装置は、私も詳しくはありませんが、ひのき無垢材の断面表示ができるように、X線管球とX線フィルムを360°スパイラル回転させながら木材の長手方向に、10mmピッチでデータを取っています。健診で身体を輪切りにした画像をイメージしていただければと思います。【スライド20】



その結果は、上がX線の画像になります。下が空中超音波で探傷した結果になります。10ミリピッチで線を引いて、X線画像と空中超音波の画像の位置を対照できるようにしています。

青色部分は、超音波が透過している部分です。赤色部分の超音波が透過していない部分は、X線画像を見ても割れが沢山あります。青色部分のX線画像では、ほぼ割れはありません。このことから、割れと超音波の画像の結果に大差はなく一致していることが分かります。

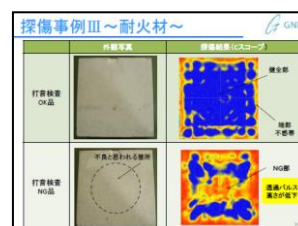
割れがなく表示されている部分は、空中超音波が試料の組織密度の差を拾ってしまうこともあるため、それを表示していると考えています。【スライド21】



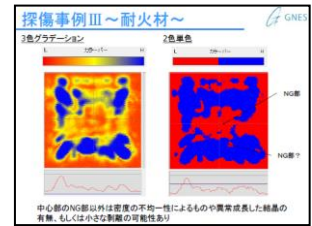
耐火材は炎に耐える建材ですが、厚物がほとんどです。このため非接触の探傷は困難で、基本的には打音による検査が行われています。傷の分布状況の把握や、それを可視化したいとの要望があり、98ミリと110ミリの厚物の探傷を行いました。

外観上は、両者に違いはありません。しかし、110ミリ側には、打音検査時に異常が発見されており、試料の提供いただいた方からは「内在亀裂はあるよ」、「しかし、どこに、どのような状態であるかはわからない」とお聞きしていました。これを空中超音波で見たいとの思いもありました。【スライド22】

こちらが探傷の結果になり、打音検査のOK品とNG品の比較になります。OK品は青い部分が多く、ほぼ健全と考えられます。一方NG品は、中央部で透過パルスの値が低下しており、内在した亀裂が生じていると考えられます。範囲が分からないという課題については、中央部から縦方向76ミリ、横128ミリに亀裂があることが分かっており、範囲の特定についても、空中超音波の検査で、その範囲も分かると思います。【スライド23】

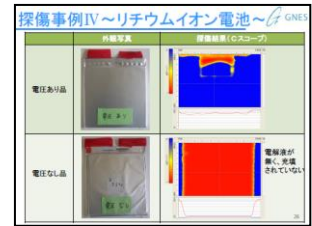


アルミハニカムパネルの時と同様に、配色を3色グラデーションと2色単色で表示したときの違いを示しています。2色の方が、損傷の判別がやりやすくなると思います。ただ、中央部は内在亀裂ですが、その他の端の部位でも検知しています。耐火材はアルミナやセラミックスを混ぜ込んだ建材ですので、その密度の不均一性や異常成長した結晶の有無、小さな剥離の可能性もあると思われます。【スライド24】



探傷事例の4番目としてはリチウムイオン電池をご紹介します。リチウムは、ご存じのとおり、水と反応すると発火する恐れがあります。電解液は漏れることはないと思いますが、漏れ出した場合は大変なことになるので、水での探傷は基本的にはできません。今回はバッテリーパックを使いまして探傷しました。【スライド25】

電圧“あり”品の結果は、真っ青ということで、音波が透過していますので、電解液も充填されて、充電されていると考えられます。電圧“なし”品は、真っ赤になります。電解液が無く、充填されておらず、空間があり、音波が通っていないことが分かりました。【スライド26】



まとめとして、高感度探触子と高出力の矩形パルス波パルサーレシーバーおよびプリアンプを用いて、アルミハニカムパネル、木材、厚物の耐火材、リチウムイオン電池を探傷しました。その結果、いずれも超音波が透過し、欠陥と記載していますが、アルミハニカムパネルであれば接着不良、木材、厚物の耐火材であれば割れ、リチウムイオン電池であれば電解液の充填状況を、欠陥として検出可能であることが分かりました。【スライド28】

今後の課題と展望についての1つ目は分解能です。ご説明の冒頭で、空中超音波の分解能は数ミリオーダーとお話ししました。もっと細かく見れば良いのですが、まずは試験体によっては1ミリ程度までは検出できるようにしたいと考えています。2つ目は、反射法についてです。先ほどは透過法として、試料を探触子で挟み込む方法についてご説明してきましたが、片側に探触子を設置して、構造物などは探傷したい、位置を確認したいというニーズがあります。論文にはありますので、実用化を図ればと思います。3つ目に、X線やX線CTとの比較になりますが、探傷における棲み分けも意識しています。X線等であれば、やはり設備投資が、場合によれば億円オーダーにもなります。超音波はそこまでの投資はかからないと思います。世の中に普及すれば、さらに価格レベルは低下することも歓迎されると思います。また、X線関係の取扱いには資格が必要ですが、超音波の利用にあたっては、そうした専門的な資格も必要ない所も利用しやすいと思います。【スライド27】

今後の課題と展望

- 分解能
- 反射法
- X線やX線CTとの比較

	超音波(空中)	超音波(水浸)	X線	X線CT
割れ	◎	◎	×	△
ボイド(窪みあり)	○	○	○	◎
クラック	○	◎	△～×	△
ワイヤ断断	×	△～○	◎	◎
異材質サンプル	×	◎	△	○
異材質サンプル	○	△～×	○	○
設備投資	低	低	高	高
資格	不要	不要	必要	必要

今日は空中超音波のお話をしましたが、現在の弊社は水浸法を中心として事業実績があります。何かお問合せやお話しがあればお声掛け下さい。今日のご清聴ありがとうございました。【スライド29】